

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS

DALIANA MÜLLER

**DESENVOLVIMENTO DE FILTROS CERÂMICOS FIBROSOS PARA GASES A
ALTAS TEMPERATURAS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em
Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de
Santa Catarina para obtenção do título de Mestre em Ciência e
Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Renato Rambo

Coorientador: Prof. Dr. Dachamir Hotza

FLORIANÓPOLIS

- 2008 -

DESENVOLVIMENTO DE FILTROS CERÂMICOS FIBROSOS PARA GASES A ALTAS TEMPERATURAS

DALIANA MÜLLER

Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais.

Prof. Dr. Carlos Renato Rambo
Orientador, EQA/UFSC

Prof. Dr. Dachamir Hotza
Coorientador, EQA/UFSC

Prof^a. Dr^a. Ana Maria Maliska
Coordenadora do PGMAT/UFSC

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Murilo D.M. Innocentini
Membro Externo – UNAERP-SP

Prof. Dr. Antônio Pedro N. de Oliveira
Membro Interno – EMC

Prof. Dr. Amir A. M. Oliveira Jr.
Membro Interno – EMC

“Sofremos demasiado pelo pouco que nos falta e
alegramos-nos pouco pelo muito que temos...”

W. Shakespeare.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus a oportunidade de estar aqui aprendendo mais a cada dia os ensinamentos da vida.

Aos meus pais, INGO e IRENE, pelo amor, dedicação, força, carinho, e por sempre estarem ao meu lado em todos os momentos da minha vida. Aos meus irmãos Igor e Anaelka e cunhada Elisandra pela amizade e incentivo e também não esquecendo da minha sobrinha Gabizinha que nos trouxe muita alegria.

Ao professor e orientador Carlos Renato Rambo, pela dedicação e incentivo demonstrado durante a realização deste trabalho. Ao professor e coorientador Dachamir Hotza, pela sugestão do tema e pela valiosa contribuição durante o estudo.

Ao Professor José Renato Coury (UFSCar) pelas análises de permeabilidade em especial Marina e Edinalda e ao Professor Wilson Acchar (UFRN) pelas análises de resistência mecânica a flexão.

À Universidade Federal de Santa Catarina e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais pela oportunidade de ingressar no curso. Ao CNPq pelo indispensável apoio financeiro.

Às amigas e companheiras de laboratório, Biana, Eliandra, Janaina, Karina e Marcela pela amizade, paciência e companheirismo nos momentos difíceis, principalmente “na choradeira...hehehe”.

Ao pessoal de química Luciano's, Luca, Sandro e o resto do povo do laboratório 302.

A Fábrica Tecnotermo pelo fornecimento da amostra de manta aluminossilicato que foi utilizada neste trabalho.

Ao secretário do curso de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Sr.
Rogério Antônio Campos por todo auxílio prestado.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE TABELAS.....	xi
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	xii
RESUMO	xiv
ABSTRACT.....	xv
1 . INTRODUÇÃO E OBJETIVOS.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	2
1.2.1 Objetivos gerais.....	2
1.2.2 Objetivos Específicos.....	2
2 . REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1. FILTROS.....	4
2.2. FILTROS CERÂMICOS NA LIMPEZA DE GASES QUENTES.....	10
2.3. PROPRIEDADES FLUIDODINÂMICAS.....	12
2.4. COLETA DE PARTÍCULAS.....	18
2.5. PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	21
2.6. APLICAÇÕES INDUSTRIAIS DE SISTEMAS DE LIMPEZA DE GASES QUENTES.....	26
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	31
3.1. OBTENÇÃO DOS FILTROS CERÂMICOS.....	31
3.1.1. Matérias-primas.....	31
3.1.2. Obtenção do meio filtrante fibroso.....	31
3.2 CARACTERIZAÇÃO.....	32
3.2.1 Análise termogravimétrica (ATG).....	32

3.2.2 <i>Análise térmica diferencial (ATD)</i>	33
3.2.3 <i>Difração de raios X (DRX)</i>	33
3.2.4 <i>Análise de Dilatometria</i>	33
3.2.5 <i>Microscopia eletrônica de varredura (MEV)</i>	34
3.2.6. <i>Análise de imagem e microtomografia computadorizada (μ-CT)</i>	34
3.2.7. <i>Ensaio de Compressão e Flexão</i>	35
3.2.8. <i>Testes de permeabilidade e filtração a altas temperaturas</i>	36
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
4.1 <i>CARACTERIZAÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA</i>	39
4.2 <i>ANÁLISE DE IMAGEM</i>	50
4.3 <i>ANÁLISE DE MICRO –CT</i>	58
4.4 <i>PROPRIEDADES MECÂNICAS</i>	61
4.4.1 <i>Ensaio de resistência à compressão de amostras sinterizadas</i>	62
4.4.2 <i>Ensaio de resistência à flexão de amostras sinterizadas</i>	66
4.5 <i>PERMEABILIDADE</i>	70
4.6 <i>FILTRAÇÃO</i>	78
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	86
5.1 <i>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</i>	87
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88
ANEXO – A	97

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mecanismos físicos de coleta (SPURNY, 1998).....	21
Figura 2: Curva típica de tensão-deformação para o vitrocerâmico LZSA celular sob compressão.....	23
Figura 3: Modelo cúbico para cerâmica celular com células abertas, l representa o comprimento da aresta e t a espessura da aresta. a) célula não deformada e b) deformação em flexão das arestas durante o regime elástico linear (Gibson, 2005).....	25
Figura 4: Modelo cúbico para cerâmica celular com células abertas, l representa o comprimento da aresta e t a espessura da aresta. a) célula não deformada e b) colapso das células por fratura frágil (Gibson, 2005).....	26
Figura 5: Esquema do equipamento a ser utilizado nos testes de permeabilidade e filtração.....	36
Figura 6: Gráfico da porosidade das amostras em relação à pressão de prensagem.....	40
Figura 7: Curva de análise térmica diferencial e análise termogravimétrica (ATG) do material fibroso, indicando as temperaturas de cristalização e degradação do PVA. Velocidade de aquecimento 10°C/min em ar sintético.....	41
Figura 8: Difratoograma de raios X dos filtros fibrosos em diferentes temperaturas de sinterização.....	42
Figura 9: Curvas de dilatométrica dos filtros fibrosos com diferentes porosidades.....	43
Figura 10: Microestrutura dos filtros fibrosos: a) amostra como recebida, b) 1000°C, c) 750°C e d) 1200°C sinterizados por 60 minutos.....	45
Figura 11: Micrografia dos filtros fibrosos com diferentes porosidades tratados por 60 minutos a 1200°C: a) fibra como recebida; b) 73%; c) 65%; d) 50% de porosidade.....	47
Figura 12: Análise química por EDX apresentando os principais constituintes dos filtros fibrosos: a) da superfície da partícula e b) da superfície da fibra.....	48
Figura 13: Microestrutura dos filtros fibrosos sinterizados a 1350°C com diferentes porosidades; a) como recebida com 95% de porosidade, b) 75%, c) 65% e d) 57%.....	49

Figura 14: Micrografia dos filtros fibrosos obtidas por MEV sinterizados por 60 minutos com diferentes porosidades; a) 57%, b) 65% siterizados a 1350°C, c) 57%, d) 66% e e) 73% sinterizados a 1200°C.....	51
Figura15: Micrografia dos filtros fibrosos sinterizados a 1350°C com 73% de porosidade...	54
Figura 16: Distribuição de diâmetro de fibra dos filtros fibrosos.....	55
Figura 17: Distribuição de tamanho médio de poro dos filtros fibrosos.....	57
Figura 18: Reconstrução de imagens tomográficas de raios X de dois filtros com diferentes densidades relativas; a) 0,88 e b) 0,95.....	58
Figura 19: <i>Structure model index</i> (SMI) em função da densidade relativa derivada de μ -CT.....	60
Figura 20: Grau de anisotropia (DA) <i>versus</i> densidade de conectividade (CD) entre poros..	61
Figura 21: Curva de Força-Deformação dos filtros cerâmicos fibrosos sinterizados: a) 1200°C e b)1350 °C com diferentes porosidades.....	63
Figura 22: Resistência à compressão em função da densidade relativa dos filtros cerâmicos fibrosos sinterizados: a) 1200°C e b)1350 °C.....	65
Figura 23: Curva de Resistência-Deformação dos filtros cerâmicos fibrosos, sob tensão de flexão, sinterizados 1200°C: a) temperatura ambiente e b) 800°C	67
Figura 24: Resistência à flexão dos filtros fibrosos a diferentes temperaturas:a) temperatura ambiente, 800°C e 1000°C sinterizados a 1200°C e b) temperatura ambiente e 1000°C em sinterizados a 1350°C.....	69
Figura 25: Curva da queda de pressão em função da velocidade em várias temperaturas para os filtros fibrosos: a) sinterizado a 750°C com porosidade de 68% e b) sinterizado a 1000°C com porosidade de 58%.....	71
Figura 26: Curva da queda de pressão em função da velocidade em varias temperaturas para filtros fibrosos com diferentes porosidades: a) 50%, b)65% e c) 73% sinterizadas a 1200°C.....	73
Figura 27: Permeabilidades: a) darciana (k_1) e b) não-darciana (k_2) em função da temperatura para os filtros fibrosos sinterizados a 750°C ($\epsilon=0,68$) e 1000°C($\epsilon=0,58$).....	75

Figura 28: Permeabilidades: a) darciana (k_1) e b) não-darciana (k_2) em função da temperatura para os filtros fibrosos sinterizados a 1200°C com diferentes porosidades.....	77
Figura 29: Dados de k_1 e k_2 constantes na literatura. Os dados para filtros cerâmicos fibrosos estão evidenciados como círculos (adaptado de Innocentini em: SCHEFFLER e COLOMBO, 2005).....	78
Figura 30: Eficiência de coleta fracionária em função do diâmetro de partícula do material particulado em diferentes porosidades e temperatura nos 20 minutos de filtração para os filtros cerâmicos fibrosos sinterizados a 1200°C.....	80
Figura 31: Eficiência de coleta fracionária para os três filtros cerâmicos fibrosos sinterizados a 1200°C operando a diferentes temperaturas: a) 25 °C; b) 300°C e c) 700°C.	82
Figura 32: Eficiência global de filtração em função do tempo nas porosidades: a) 73%, b) 65% e c) 50% para os filtros cerâmicos fibrosos sinterizados a 1200°C.....	84

LISTA DE TABELAS

Tabela I: Influência da temperatura e pressão sobre a coleta de partículas (adaptado de: Cheung, 1989).....	20
Tabela II: Características físicas e condições de operação dos ensaios de filtração.....	39
Tabela III: Porosidades obtidas através de diferentes técnicas.....	53
Tabela IV: Parâmetros morfométricos dos filtros cerâmicos fibrosos.....	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ATG - análise termogravimetria

C_1 , C_2 e C_3 - constantes de proporcionalidade relacionadas com a geometria da célula

CCD – dispositivo de carga acoplada

CD – densidade de conectividade

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

DA – Grau de anisotropia

D_f – diâmetro de fibra.

d_p - diâmetro médio da partícula (μm)

DrATG - derivada primeira da curva de análise termogravimétrica

DRX – difração de raio X

E – eficiência de coleta

E_G – Eficiência global de coleta

EDX – Energia dispersiva

E^* - módulo de elasticidade do material celular

E_s - módulo de elasticidade da fração sólida

EPA – Agencia de proteção ambiental

F - força normal aplicada (N)

G^* - módulo de cisalhamento do material celular

H – altura d leito (mm)

k_1 - constante de permeabilidade darciana (m^2)

k_2 - constante de permeabilidade não-darciana (m)

K_v – constante de coleta para um filtro fibroso

L - espessura da amostra (mm)

$N_{e,i}$ – número de partículas de diâmetro na entrada do filtro

$N_{s,i}$ – número de partículas de diâmetro na saída do filtro

\bar{n} - número médio de arestas por face

n - constante que depende da tortuosidade, como uma medida de desordem no material e está relacionado coma distribuição e geometria da célula

MEV - microscopia eletrônica de varredura

P – pressão absoluta (Pa)

ΔP - queda de pressão (Pa)

PHA – Hidrocarbonetos

PVA – acetato de polivinílico

R - constante dos gases

t - espessura de aresta (μm)

T - temperatura absoluta ($^{\circ}\text{C}$)

ΔT - variação de temperatura ($^{\circ}\text{C}$)

ν^* - coeficiente de Poisson

v_s - velocidade superficial de escoamento (m s^{-1})

μ -CT - microtomografia computadorizada

ε - porosidade do meio (%)

μ - viscosidade absoluta do fluido ($\mu\text{ Pa s}$)

ρ - densidade do fluido (kg m^{-3})

ρ_{He} – densidade picnométrica

ρ_G – densidade geométrica

ρ_o/ρ_s - densidade relativa

ρ_o - densidade da estrutura celular (g cm^{-3})

ρ_s - densidade da fração sólida (g cm^{-3})

σ_o - tensão de ruptura do material celular (Pa)

σ_s - tensão de ruptura da fração sólida (Pa)

SMI – structure model index

RESUMO

Estruturas fibrosas são especialmente indicadas para filtração a temperaturas elevadas, pela alta permeabilidade aliada à alta eficiência de coleta. Neste trabalho, mantas refratárias sílico-aluminosas comerciais foram prensadas uniaxialmente, utilizando-se 10% em massa de acetato de polivinila como ligante. Após a prensagem as amostras foram submetidas a um tratamento térmico a 500°C durante 1 h para degradação do polímero. Subsequentemente, as amostras foram sinterizadas a temperaturas de 1200°C e 1350°C durante 1 h, resultando em uma estrutura fibrilar porosa com densidades relativas entre 0,28 e 0,43, que correspondem a porosidades na faixa de 53% a 73%, respectivamente. A arquitetura tridimensional de uma cerâmica celular/fibrosa (densidade relativa <0,3) foi caracterizada pelos seguintes parâmetros morfométricos: distribuição de tamanho de poro, espessura da parede, grau de anisotropia, densidade de conectividade, índice estrutural, porosidade e natureza de poros (fechados/abertos). Neste trabalho foi avaliada a influência desses parâmetros nas propriedades mecânicas de filtros fibrosos. A morfologia dos filtros fibrosos foi caracterizada através de microscopia eletrônica de varredura, software de análise de imagem (IMAGO[®]) e microtomografia computadorizada (μ -CT). A resistência mecânica foi avaliada através de ensaios de compressão. Ensaios de permeabilidade, resistência à flexão de 4 pontos e eficiência de coleta em função da temperatura foram efetuados e os resultados comparados aos filtros existentes. Os valores obtidos para a permeabilidade e eficiência de coleta estão na ordem de grandeza esperada para filtros de gases, apresentando assim grande potencial para aplicações industriais.

ABSTRACT

Fibrous structures are specially indicated for gas filtration at high temperatures due to their high permeability and high collection efficiency. For high temperature gas filtration, a compromise between mechanical properties and permeability is desired. In this work flexural strength and permeability of Al_2O_3 -based fibrous filters were evaluated at high temperatures. Refractory silica-aluminate fibers were uniaxially pressed with polyvinyl acetate (10wt.%) as binder and subsequently sintered in air at 1200°C or 1350°C for 1 h, which resulted in porous fibrous structures with relative densities in the range of 0.28-0.43. The microstructure analysis of the fibrous filters revealed a porous morphology composed of three-dimensional interconnected fibers. Morphometric analysis were evaluated by image analysis using the software IMAGO[®] and microtomography (μ -CT). Mechanical strength was evaluated by compressive strength tests at room temperature. Flexural strength tests from room temperature and at 800°C were performed to evaluate the integrity of the filters at high temperature operation conditions. Permeability and collection efficiency were also evaluated in function of the temperature. The values of permeability and filtration efficiency are in the order of magnitude of commercially available filters, which makes the developed fibrous filter suitable for several industrial applications.

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

A poluição crescente por material particulado e o desperdício industrial conduziram a avanços tecnológicos para controlar e limitar poluentes atmosféricos. As emissões de particulados estão entre os muitos tipos indesejáveis de desperdícios industriais. Quase todas as indústrias emitem partículas de algum tipo, que são geralmente removidas por filtração (AL-OTOOM, 2005).

A filtração de gases a altas temperaturas é considerada um dos mais promissores recursos no desenvolvimento da tecnologia de coleta de partículas, visto que a limpeza de gases a altas temperaturas é de grande importância não só por motivos ambientais como também econômicos. Durante os últimos 15 anos foram realizados avanços tecnológicos significantes com respeito ao desenvolvimento, manufatura, avaliação do material, análise do desempenho e viabilidade dos elementos filtrantes. (AL-OTOOM, 2005). O uso de elementos filtrantes compostos por material cerâmico tem despertado grande interesse, por resistirem a temperaturas superiores a 1000°C, filtrando com extrema eficiência e com baixo custo na fabricação e manutenção (INNOCENTINI, 1997, e REIJNEN E BRAKEL, 1984).

Dentre as diversas aplicações tecnológicas dos filtros cerâmicos, destacam-se a utilização em incineração de resíduos domésticos, hospitalares e industriais, craqueamento catalítico, bem como refino de metais, combustão de diesel em veículos automotivos e filtração de gases quentes (FREITAS et al., 2004).

O uso de filtros fibrosos tem se destacado por ser umas das melhores alternativas na filtração de partículas na faixa submicrométrica, por apresentar alta porosidade, alta área superficial e, principalmente, alta permeabilidade. Sua eficiência de coleta é muito alta e a queda de pressão é baixa. No entanto, essa classe de filtros, geralmente apresenta baixa resistência mecânica (FREITAS et al., 2006).

Um dos principais parâmetros em aplicações envolvendo filtração é a permeabilidade, que é a propriedade que indica a maior ou menor facilidade à passagem do fluido através de um meio poroso (INNOCENTINI et al., 1999). Idealmente, o filtro cerâmico deve remover o máximo de impurezas com a mínima resistência ao fluido de arraste, apresentando ainda uma resistência mecânica adequada aos processos de limpeza do material retido (FREITAS et al., 2004 e SALVINI et al., 2001).

Considerando a importância de um conhecimento científico mais profundo sobre o comportamento de filtros fibrosos na filtração de aerossóis e a necessidade de se desenvolver tecnologias nacionais que evitem a contaminação do meio ambiente, torna-se diretriz a busca por materiais que se adequem a processos industriais de filtração a temperaturas elevadas.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivos gerais

Este trabalho tem como objetivo desenvolver um filtro cerâmico capaz de remover partículas de gases a altas temperaturas. Neste estudo foram desenvolvidos filtros que aliem uma boa estabilidade térmica e mecânica a um bom desempenho em processo de filtração a temperaturas elevadas, qual seja, máxima eficiência de coleta e mínima perda de carga (alta permeabilidade).

1.2.2. Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo principal proposto, é necessário que os seguintes objetivos sejam atingidos:

- Escolha e caracterização das matérias-primas;
- Manufatura dos filtros;
- Avaliação da resistência mecânica, permeabilidade e eficiência de coleta dos filtros em função da temperatura;
- Desenvolvimento de um protótipo em escala laboratorial.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. FILTROS

O progresso industrial tem fornecido para a humanidade muitos benefícios materiais e sociais, mas ao mesmo tempo tem trazido muitos problemas para as mesmas. Um destes problemas é a poluição do meio ambiente.

A poluição urbana do ar é provavelmente o produto indesejável mais visível da civilização. O ar poluído é definido como um ou mais constituintes não normalmente presentes no ar e geralmente presentes em concentrações maiores do que o normal, respeitando-se as normas e leis vigentes. As partículas microscópicas que flutuam no ar são de muitos tipos: partículas de sólidos suspensas, de fumaça, partículas fotoquimicamente formadas entre outras (TIENI, 2005).

Um aspecto característico da operação unitária da filtração é a variedade de equipamentos disponíveis para a separação das partículas sólidas do fluido. Esta variedade tem sido conseqüência da multiplicidade dos problemas de filtração, em que suspensões de alta ou baixa concentração de partículas devem ser separadas de gases, os quais podem ser corrosivos, viscosos e explosivos. Apesar desta complexidade, as informações sobre as partículas e o fluido podem ser usadas para racionalizar os métodos de separação. Deste modo, os tamanhos de partículas, concentração de sólidos e eficiência, poderiam levar as decisões sobre a adequação de uma forma particular de filtro e as condições ideais de operação (STEFFENS, 2007).

Tecnologias de proteção ambiental movimentaram ao longo dos últimos anos, uma grande soma de recursos, em conseqüência direta do crescente rigor das normas de emissão e controle de poluentes.

Países desenvolvidos têm investido maciçamente em métodos de limpeza de gases que permitam não somente a remoção eficiente de poluentes, mas também o reaproveitamento

energético do processo. O desenvolvimento de novos materiais para a filtração chega a representar 30% desse valor (INNOCENTINI, 1997).

Na luta pela preservação da qualidade do ar, limpadores de gases são utilizados para a remoção de partículas contidas nesses gases. O aprimoramento de processos utilizados na remoção de partículas de correntes gasosas tem estado cada vez mais em pauta devido à grande preocupação com os problemas ambientais e as possíveis conseqüências para o bem estar da população mundial (TIENI, 2005).

Materiais cerâmicos de baixa densidade, rígidos e fibrosos possuem grande potencial para aplicações da filtração especialmente por causa de suas propriedades térmicas, químicas e mecânicas. Os tipos e as aplicações para filtração de gases quentes incluem processos tais como na geração de energia termelétrica a combustão de carvão, gaseificação de carvão, incineração, processamento e recobrimento catalítico e processamento químico e petroquímico (FERNANDO and CHUNG, 2002).

Existem diversos equipamentos a limpeza de gases quentes e estes são relativamente eficientes, dependendo do processo e do poluente envolvido. Em altas temperaturas, no entanto, o ambiente hostil que contém pequenas partículas e freqüentemente gases tóxicos, restringe as opções disponíveis. Filtros de manga e lavadores exigem o resfriamento da corrente gasosa, inviabilizando a recuperação de energia, muitas vezes o principal produto do processo. O uso de ciclones e precipitadores eletrostáticos, por sua vez, têm se tornado menos comum com o crescente rigor nas normas de emissão de particulados para a atmosfera (DULLIEN, 1989).

O uso de filtros cerâmicos apesar de estarem comercialmente estabelecidos, ainda sofre com a falta de uma teoria mais aplicável para descrever seu desempenho a longo prazo. Permeabilidade, eficiência de coleta e resistência mecânica são os parâmetros que devem ser avaliados e adequados de acordo com o processo de interesse. As complexas e dinâmicas

interações que ocorrem entre as partículas e a superfície do filtro, no entanto, tornam o comportamento do filtro cerâmico extremamente dependente das condições de operação e do tipo de aerossol envolvido (FREITAS et al., 2004).

Em geral, para uma adequada remoção de partículas, um filtro exige: baixa resistência, vida útil longa e volume para ser competitivo, em custo inicial e durante seu uso, com outros métodos de remoção de aerossóis. A principal limitação para a escolha do filtro está relacionada com a natureza de seu material constituinte. Para filtros fibrosos, uma variedade de fibras naturais ou sintéticas pode ser utilizada. É necessário selecionar um material que apresente baixo custo e que tenha uma vida longa sob as condições predominantes de um dado processo (RODRIGUES, 2005).

Existem basicamente três tipos de arranjos alvos coletores na filtração de gases:

- a) Fibras individuais emaranhadas frouxamente dentro de um enchimento;
- b) Material granular em leito fixo ou fluidizado;
- c) Fibras, tecidos ou feltros dentro de uma estrutura, sendo utilizados no formato cilíndrico (manga).

Todos os arranjos são capazes de obter altos valores de eficiência de coleta com razoáveis valores de queda de pressão e tempo de limpeza

Supõe-se que para um bom funcionamento do filtro, este deve apresentar as seguintes características:

- Ser suficientemente poroso para permitir uma satisfatória vazão de ar a uma queda de pressão compatível com o processo;
- Resistir às forças causadas pela pressão diferencial por perturbações mecânicas e por pulsação no processo de limpeza;

- Resistir mecanicamente ao engate com peças metálicas;
- Resistir ao ataque químico com o material filtrado, especialmente se houver umidade presente devido à condensação;
- Resistir às altas temperaturas da exaustão de gases, cada filtro tem temperatura limite definida, além da qual tenderá a uma deterioração acelerada;
- Apresentar uma textura de superfície que favoreça uma rápida liberação da torta durante a limpeza. (CAVASENO, 1980).

Os principais candidatos cerâmicos para a manufatura de filtros são cordierita, mulita, alumina e carbetto de silício. As exigências para estes filtros cerâmicos, cuja função principal é a remoção das partículas finas a temperaturas elevadas, são porosidade elevada (50 - 80%), resistência mecânica adequada, resistência a erosão, resistência ao choque térmico e permeabilidade. De acordo com os materiais adequados para estes tipos de aplicações, o filtro depende criticamente da microestrutura e das suas propriedades mecânicas e térmicas associadas.

A Mulita ($3\text{SiO}_2 \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$) é uma candidata promissora para o uso em aplicações de filtros de gases quentes porque pode ser economicamente processada e o mais importante, possui diversos atributos benéficos importantes na operação: apresenta baixa expansão térmica, boa resistência ao choque térmico e à corrosão e estabilidade mecânica a alta temperatura (LATELLA et al., 2006). Como mineral, a mulita é rara na natureza e depósitos atuais não são suficientes para abastecer um mercado crescente em função das novas aplicações encontradas. Isso faz com que muitos pesquisadores procurem sintetizá-la, principalmente através de misturas de Al_2O_3 e SiO_2 , ou a partir de minerais que apresentam Al_2O_3 e SiO_2 em suas composições (MONTEIRO et al., 2004).

De acordo com as estruturas de seus constituintes, os filtros cerâmicos podem ser divididos em filtros fibrosos e granulares. Os granulares são usualmente modelados como um conjunto de partículas ou grãos, de forma esférica ou não, dispostas regular ou randomicamente, e representam a grande maioria dos meios porosos. Já os fibrosos são modelados como um conjunto de fibras, que podem ser naturais ou sintéticas, retas ou curvas, estando randomicamente dispostas ou em malhas regulares (JACKSON e JAMES, 1986).

O uso de filtros fibrosos tem se destacado por ser umas das melhores alternativas na filtração de partículas na faixa submicrométrica, por apresentar alta porosidade, alta área superficial e, principalmente, alta permeabilidade (FREITAS et al., 2004). Sua eficiência de coleta é muito alta e a queda de pressão é baixa; porém, essa classe de filtros, geralmente apresenta baixa resistência mecânica (FREITAS et al., 2006).

Os filtros fibrosos são tipicamente manufaturados com fibras de diâmetros acima de 10 μm , com porosidades geralmente entre 80-90%. A distribuição de diâmetro das fibras para um determinado filtro é normalmente heterogênea, embora alguns tipos de filtros fibrosos possam ser constituídos de fibras com tamanho uniforme. O formato da seção transversal das fibras também pode variar, sendo normalmente cilíndrica. Propõe-se que tal estrutura possa remover as partículas submicrométricas e micrométricas com uma eficiência elevada, mantendo uma resistência relativamente baixa ao fluxo de ar. A eficiência dos filtros fibrosos alcança um mínimo então chamado MPPS (maior penetração de tamanho de partículas), que está geralmente entre 0,1 e 0,5 μm para filtros cerâmicos.

As fibras são caracterizadas por uma área de superfície muito grande em relação ao volume, que aumenta significativamente a probabilidade da deposição das partículas do aerossol na superfície da fibra e aumenta a eficiência do filtro. Além de uma alta área superficial em relação ao volume, os meios fibrosos apresentam baixo peso, elevada permeabilidade, e pequeno

tamanho de poros, que os fazem apropriados para uma ampla gama de aplicações seu processo de filtração (PODGÓRSKI et al., 2006).

Um meio fibroso que tem características desejáveis para remoção de partículas do fluido que permeia, não se comporta simplesmente como uma peneira, que remove e retém as partículas somente devido aos espaços entre as fibras do meio possuírem dimensões menores em do que as partículas. Uma peneira fibrosa poderia ser utilizada para limpar o ar do material particulado, mas os espaços entre as fibras seriam rapidamente bloqueados pelas partículas já retidas. O meio ofereceria uma resistência tão grande ao fluxo do ar que ele se tornaria inútil.

Um meio fibroso ideal para remoção de partículas suspensas no ar deve apresentar uma rede de fibras suficientemente aberta para oferecer uma baixa resistência ao fluxo de ar e permitir que as partículas atravessem por entre as fibras. Essa rede fibrosa seria construída de tal forma que as partículas colidissem com o material fibroso. Uma partícula que colida com uma fibra vai aderir a ela devido às Forças de Van der Waals. Se as fibras apresentam-se largamente dispersas no material fibroso, as partículas retidas estarão, da mesma forma, largamente dispersas no meio filtrante e assim não bloqueariam os espaços entre as fibras. Conseqüentemente, a resistência oferecida ao fluxo de ar não aumentará excessivamente com o aumento de material particulado retido do ar. Na prática, é possível se chegar a um meio fibroso ideal. Esse meio eficiente permitiria somente uma pequena penetração de partículas e ao mesmo tempo ofereceria uma baixa resistência ao fluxo de ar (MUNHOZ e STEFFENS, 2007).

Os meios fibrosos foram menos investigados que os materiais granulares e conseqüentemente a correlação entre sua resistência mecânica e permeabilidade com a estrutura do meio são menos compreendidas. A geometria do filtro é determinada pelas características da fibra, seu tamanho, concentração, e arranjo (SOKOLOVIC et al., 2003). A eficácia dos meios fibrosos para remover os materiais particulados depende de um número de fatores, incluindo o

diâmetro da fibra, a orientação da fibra, a velocidade e o carregamento de particulados no fluido gasoso (FERNANDO e CHUNG, 2002). Os meios fibrosos podem ser classificados em: feltros (tecidos e não tecidos) e meios sinterizados em formas de velas, sacos ou cartuchos. Para aplicações em temperaturas ambientes as fibras são feitas de papel, algodão, lã ou materiais sintéticos (poliamidas, poliéster, etc.). Para filtração a alta temperatura, as fibras são compostas de metais ou ligas metálicas e principalmente cerâmicas como, alumina, mulita, zircônia e sílica. Nestes casos, o diâmetro da fibra usualmente varia entre 2 e 20 μm e a porosidade (ϵ) média varia de acordo com os métodos de fabricação: $0,35 < \epsilon < 0,5$ para algodões e $0,6 < \epsilon < 0,95$ para feltros (INNOCENTINI 2005 em SCHEFFLER e COLOMBO).

Portanto, os filtros fibrosos são relativamente baratos e de simples operação e, além disso, fornecem os meios mais eficientes de coletar partículas. Com isso à necessidade crescente de proteger a saúde humana da exposição às partículas finas, processos de filtração tornam-se cada vez mais importantes (SONG et al., 2006).

2.2. FILTROS CERÂMICOS NA LIMPEZA DE GASES QUENTES

A filtração em altas temperaturas é uma tecnologia que atrai a atenção significativa em uma variedade larga dos processos. Isto porque se mostrou que a qualidade dos filtros, a eficiência do processo contínuo e a economia podem ser melhoradas com o uso da filtração à alta temperatura. Em muitos processos, a filtração a temperaturas elevadas é requerida para evitar as reações indesejáveis de condensação ou de sublimação, que resultam em sujar os filtros ou em poluir os produtos (HEIDENREICH et al., 2005).

Pode-se dizer que o interesse por filtros cerâmicos são responsáveis por mais de 80% do espaço dedicado na literatura ao desenvolvimento de sistemas de limpeza de gases quentes

(BERGMAN, 1993, PEWKERT e LOEFFLER, 1991, SEVILLE et al., 1989, ZIEVERS et al., 1991, 1993). As excelentes propriedades de filtração e o baixo custo de fabricação e manutenção tornaram filtros cerâmicos a opção preferida na maioria das aplicações de limpeza (JUDKINS et al., 1996, LIPPERT et al., 1993, OWEN et al., 1983).

Uma das melhores tecnologias já comprovadas na filtração de partículas na faixa micro e sub-micrométrica consiste na utilização de filtros rígidos cerâmicos. As resistências térmica, química e mecânica, além da altíssima eficiência de coleta fazem desse tipo de filtro o melhor candidato a processos de filtração de aerossóis. Embora o princípio de operação seja o mesmo para diferentes filtros com esse propósito (barreira física), as diferentes geometrias existentes refletem o interesse em otimizar características específicas do filtro, como área de filtração, durabilidade e custo.

São quatro os principais critérios de desempenho de um filtro do tipo barreira, qualquer que seja sua estrutura ou aplicação: permeabilidade, eficiência de coleta, durabilidade e resistência mecânica. O primeiro é uma medida indireta da energia necessária para movimentar os gases através do sistema de limpeza. A eficiência de coleta reflete a preocupação com os limites de emissão de particulados constantes em normas do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, Res. Nº 382/2006). A durabilidade, por sua vez, é refletida economicamente no número de interrupções para troca do filtro ou em gastos para sua reposição.

Os filtros devem apresentar não somente alta permeabilidade e eficiência de retenção de inclusões sólidas, mas também boa resistência mecânica. Estes parâmetros são influenciados de modos distintos para uma determinada estrutura. Poros grandes favorecem a permeabilidade, mas reduzem a eficiência de coleta das partículas. Poros pequenos, por sua vez, aumentam a eficiência de retenção de inclusões sólidas, mas também aumentam a queda de pressão no filtro. A presença dos poros em cerâmicas é decorrente das condições de processamento usualmente

empregadas e pode ter conseqüências positivas ou não em relação ao desempenho desses materiais. Em relação ao comportamento mecânico, a presença de poros implica na diminuição da resistência. A resistência mecânica de cerâmicas porosas diminui com o aumento da porosidade, ao passo que a permeabilidade aumenta. A melhoria na resistência mecânica de filtros cerâmicos pode ser obtida pela densificação dos filamentos ou pelo aumento dos números de filamentos (SALVINI et, al., 2002, INNOCENTINI et, al., 1998 e VASCONCELOS, 1997). Comercialmente filtros cerâmicos com porosidades entre 70% e 90% mostram tipicamente a permeabilidade Darciana entre de 10^{-10} e 10^{-8} m^2 e resistência à compressão variando entre 0,5 e 2,0 MPa (SALVINI et, al.,2001). A falha em um desses critérios é suficiente para comprometer o funcionamento do filtro.

A poluição crescente de partículas no desperdício industrial conduziu a uma crescente regulamentação visando o controle e a limitação destes poluentes na atmosfera. Certamente a emissão contínua de tipos diferentes de partículas, corrosivas ou tóxicas na atmosfera pode afetar a saúde ou o ambiente. Adicionalmente os efeitos negativos destas partículas são relacionados fortemente com suas características, em especial seu tamanho (RUIZ et al., 2000).

2. 3. PROPRIEDADES FLUIDODINÂMICAS

A permeabilidade é uma das propriedades mais importantes de filtros cerâmicos, pois esta propriedade é função direta da queda de pressão durante a filtração. A permeabilidade é a facilidade com que um fluido pode escorrer através de um meio poroso. A interação entre o fluido e o meio poroso causa uma transformação na energia do sistema, geralmente associada a uma diminuição da pressão exercida pelo fluido no meio poroso (INNOCENTINI & PANDOLFELLI, 1999a; ISOB et al, 2007).

A predição e a medida da permeabilidade são essenciais no projeto e na operação de filtros cerâmicos fibrosos. As características de escoamento através de meios fibrosos são relacionadas às propriedades do fluido e das fibras. A avaliação da permeabilidade é baseada em modelos teóricos, levando-se em conta regimes de escoamento e perda de carga através de meios porosos. Há na literatura diversos estudos sobre o escoamento de fluidos através de meios porosos, que se baseiam na clássica lei de Darcy (CHOI et al., 1998).

A permeabilidade de sólidos porosos é um dos mais importantes parâmetros em aplicações envolvendo filtração. Idealmente um filtro deve ser capaz de remover o máximo de impurezas com o mínimo de resistência ao fluxo. Isto pode ser conseguido através do aumento da porosidade ou da passagem do fluido dentro da estrutura. Ambas as opções, entretanto, causam uma diminuição na resistência mecânica do filtro. Consequentemente, a otimização da relação permeabilidade/resistência mecânica depende da combinação ideal do tamanho de poro e porosidade (INNOCENTINI et al., 1998 e INNOCENTINI et al., 1999b). Um filtro pode remover 100% das partículas da corrente gasosa e ainda ser inviável economicamente se sua permeabilidade for baixa. Em condições de operação, estes filtros estão sujeitos aos impactos repetidos das partículas finas, geralmente menores que 8 μm ou de migrar em maiores velocidades entre de 2 a 5 cm/s em um fluido gasoso em temperaturas que variam normalmente de 400 a 1000°C. Assim, o elemento filtrante deve suportar o contato das partículas, o aumento repentino da temperatura e o diferencial de pressão devido ao gás (LATELLA et al., 2006).

O comportamento aerodinâmico de um filtro cerâmico é também extremamente importante em aplicações catalíticas. A turbulência tem efeito sobre a taxa de energia liberada durante a combustão ou sobre o contato químico em um processo catalítico. A mistura e o tempo de residência no interior dos poros são fatores determinantes em ambos os casos.

A permeabilidade é considerada uma medida macroscópica que avalia com que o fluido conduz pelo gradiente do fluxo de pressão até o final nos meios porosos vazios. Deste modo, a permeabilidade não é nenhuma propriedade do fluido nem do meio poroso porém é refletida efetivamente nestas interações.

Permeabilidade de meios porosos é comumente expressada por parâmetros diretos que são derivadas de duas equações principais: Lei de Darcy, Eq. (1), e Forchheimer equação, Eq. (2) (INNOCENTINI et al., 1999c). Um dos primeiros pesquisadores a equacionar empiricamente a modificação na energia do fluido causada pela sua passagem através de um meio poroso foi Darcy em 1856. Para baixas velocidades Darcy propôs que, o gradiente de pressão ($\Delta P/L$) de um fluido incompressível com viscosidade (μ) escoando através de um meio poroso, como expressado pela equação (1).

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{k_1} v_s \quad (1)$$

A constante de permeabilidade Darciana, conhecida k_1 ou viscosa, é uma propriedade apenas da estrutura porosa.

Trabalhando também com meios granulares Reynolds e Forchheimer, perceberam que a Lei de Darcy não apresentava bons resultados para elevadas velocidades do fluido. Perceberam que ao invés de uma relação linear entre queda de pressão e velocidade, estava ocorrendo uma relação parabólica, e associaram-na à variação da energia cinética do fluido com densidade (ρ) durante seu escoamento pelo meio poroso. Com isso a permeabilidade pode ser determinada pela equação de Forchheimer Equação 2. Onde o termo $\mu v_s/k_1$ representa a contribuição das forças viscosas sobre a queda de pressão causada pelo atrito entre as moléculas do fluido e também pelo atrito entre o fluido e a parede do meio poroso. O termo $\rho v_s^2/k_2$ representa as forças inerciais causadas pela turbulência do fluido escoante e/ou pela tortuosidade do meio poroso. A

predominância de um ou de outro termo é função da faixa de velocidade utilizada. Para baixas velocidades ($v_s < 10 \text{ cm/s}$) apenas o primeiro termo é significativo, reduzindo assim a equação de Forchheimer à lei de Darcy Equação 1 (MOREIRA et al, 2004; INNOCENTINI & PANDOLFELLI, 1999b).

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{k_1} v_s + \frac{\rho}{k_2} v_s^2 \quad (2)$$

onde ΔP é a diferença de pressão (fluidos compressíveis $\Delta P = P_o^2 - P_i^2 / 2P_o L$; fluidos incompressíveis $\Delta P = P_o - P_i / L$), L é a espessura do meio, μ e ρ são a viscosidade e a densidade do fluido, e v_s representa a vazão volumétrica pela área de seção transversal perpendicular ao escoamento do fluido. Os parâmetros k_1 e k_2 são normalmente atribuídos a permeabilidade Darciana e não-Darciana, respectivamente (MOREIRA et al, 2004). Quando os efeitos cinéticos são negligenciados, a Equação 2 reduz-se à lei de Darcy, indicando somente a dependência linear da velocidade do gás em relação ao gradiente de pressão.

A diferença básica entre as equações 1 e 2 são o tipo de dependência que a pressão do fluido assume quando relatado para velocidades do fluido. A Lei de Darcy que é derivada de experimentos conduzidos para velocidades muito baixas, considera somente os efeitos viscosos para o fluido da queda de pressão e institui a dependência linear entre o gradiente de pressão e a velocidade do fluido através de meios porosos. A equação de Forchheimer por outro lado, considera que o gradiente de pressão exibe uma tendência parabólica com o aumento da velocidade do fluido devido às contribuições inerciais e turbulentas. A Lei de Darcy foi amplamente aplicada na literatura por sua simplicidade, no entanto a equação de Forchheimer produziu resultados mais realísticos e confiáveis para parâmetros de permeabilidade. Na verdade

o uso da Lei de Darcy e Forcheimer depende muito da determinação correta do regime do fluxo dentro dos meios porosos (INNOCENTINI et al., 1999d).

Efeito da temperatura e pressão do gás

Parâmetros como temperatura e a pressão do gás podem afetar a permeabilidade do filtro de duas maneiras. Uma maneira é a alteração causada pela dependência das propriedades do gás com a pressão ou temperatura. A outra maneira refere-se a alterações na própria estrutura cerâmica.

A variação na densidade do gás, na maioria das vezes, pode ser obtida diretamente da lei dos gases ideais, desde que o gás não esteja submetido a pressões muito elevadas. A influência da temperatura e pressão sobre densidade e viscosidade do gás poderia então ser quantificada como:

$$\rho(T) = \rho_o \frac{P T_o}{P_o T} \quad (3)$$

Onde: $\rho(T)$ é a densidade do gás na temperatura e pressão de interesse e ρ_o é a densidade do gás em uma temperatura absoluta (T_o) e pressão de referência (P_o).

$$\mu_{ar}(T) = 1,73 \times 10^{-5} \left(\frac{T}{273} \right)^{1,5} \left\langle \frac{398}{T + 125} \right\rangle \quad (4)$$

Onde: T a temperatura em Kelvin e μ_{ar} é a viscosidade do ar em Pa.s.

O efeito total sobre a queda de pressão de um filtro pode ser obtido somando-se as contribuições individuais da densidade e da viscosidade segundo a equação de Darcy Equação (1). A velocidade de filtração também deve ser corrigida para ajuste da densidade do gás, quando a filtração é realizada em uma vazão mássica constante:

$$v_s(T) = v_{so} \frac{P_o T}{P T_o} \quad (5)$$

Onde $v_s(T)$ é a velocidade de filtração nas condições de interesse.

Temperatura e pressão podem também apresentar efeitos diferentes sobre a queda de pressão do filtro, dependendo do intervalo de predominância dos termos viscoso e inercial na equação de Forcheimer. A temperatura do gás também pode alterar as constantes de permeabilidade do meio filtrante, k_1 e k_2 . Dependendo do coeficiente de dilatação térmica, a estrutura porosa pode sofrer uma expansão ou contração, com alteração da porosidade e consequentemente da permeabilidade.

Permeabilidade em meios fibrosos

Aplicações fluido-dinâmicos em meios fibrosos são essencialmente relatadas para processos de filtração de suspensões líquidas ou gasosas e mais recentemente para equipamentos de transferência de calor.

A permeabilidade de meios fibrosos depende do tamanho, concentração e arranjo das fibras. Isto é presumido para que as fibras sejam circulares ou aproximadamente e com um diâmetro uniforme. É difícil construir um material fibroso realmente homogêneo, e essa não-uniformidade pode causar um aumento na permeabilidade do meio em torno de 50% (JACKSON e JAMES, 1986).

Seville et al. relataram que a permeabilidade para estruturas fibrosas de elementos cerâmicos de alta porosidade ($\varepsilon \cong 0,8-0,95$) e alta área de superfície específica ($S_o \cong 0,8-1,5 \times 10^6 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$). Innocentini (INNOCENTINI, 1999) trabalhou com o fluxo de ar através de meios

fibrosos comerciais similares ($\varepsilon \cong 0,8$) e determinou valores médios experimentais para k_1 e k_2 como $1,72 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ e $2,04 \times 10^{-6} \text{ m}$, respectivamente.

Diversas equações semi-empíricas foram propostas para a determinação de k_1 (Darciana) em meios fibrosos, como a proposta por Davies (INNOCENTINI em 2005 SCHEFFLER e COLOMBO):

$$k_1 = \frac{d_f^2}{64(1 - \varepsilon)^{1,5} [1 + 56(1 - \varepsilon)^3]} \quad (6)$$

Esta equação é válida para variações de porosidade $0.6 < \varepsilon < 1.0$.

2. 4. COLETA DE PARTÍCULAS

A eficiência de coleta de filtros limpos depende do número de partículas e das propriedades do fluido.

O termo filtração é usado para descrever a ação em que o gás a ser limpo passa através de um filtro “um meio poroso e permeável” que coleta e retém as partículas do gás. Uma vez que as passagens através dessa barreira são tipicamente comparáveis ou menores que o tamanho do material particulado, as partículas são separadas na superfície do filtro primariamente por interceptação direta ou impactação inercial (BROWN, 1993, COURY, 1983). Quando se pensa em um meio filtrante composto por fibras, imagina-se inicialmente que as partículas sejam retidas por possuírem um diâmetro maior do que o espaço entre as fibras. O filtro funcionaria de maneira semelhante a uma “peneira” microscópica formada pelas fibras, cuja distância entre elas definiria o menor tamanho de partícula por ela retida. Se isso for examinado em meios filtrantes reais, esta imagem do filtro seria incorreta. Nele se encontra apenas uma pequena parte do volume do meio filtrante sendo ocupadas pelas fibras, restando até 90% de espaços vazios.

Por outro lado, a eficiência de retenção depende da velocidade do gás, o que não deveria acontecer se o espaço entre as fibras fosse determinante da faixa de retenção. (STEFFENS, 2007)

Outros mecanismos, como difusão browniana, gravidade e atração eletrostática também estão presentes e ajudam a promover o contato partícula-superfície e sua retenção em meios fibrosos (BROWN, 1993, COURY, 1983, RODRIGUES, 2005 e STEFFENS, 2007).

A filtração em filtros rígidos deveria ser totalmente superficial, em contraste com a filtração em um filtro de leito granular, onde a coleta ocorre no interior da estrutura. A presença de partículas pequenas no aerossol e o fato do filtro ser um meio poroso fazem com que na prática haja penetração em uma pequena região da estrutura do filtro.

A filtração superficial em um filtro rígido envolve três estágios: i) captura da partícula pela superfície coletora; ii) retenção da partícula capturada na superfície e iii) efeito da partícula retida sobre a próxima partícula coletada. No primeiro estágio, diferentes mecanismos contribuem para o contato partícula-superfície. Dependendo da força de adesão entre ambos, a partícula pode ficar retida permanentemente ou retornar à corrente gasosa e continuar seu trajeto. Após a retenção, a partícula passa a contribuir para a captura de novas partículas do aerossol. Durante esse estágio, a eficiência de coleta do filtro é aumentada, e a torta de pó sobre o filtro é a única responsável pela limpeza do gás.

Influência da pressão e temperatura

A temperatura e a pressão da corrente gasosa parecem pouco alterar os mecanismos de coleta (INNOCENTINI, 1997 –Tabela I).

Tabela I: Influência da temperatura e pressão sobre a coleta de partículas (adaptado de: INNOCENTINI, 1997).

Mecanismo	Efeito da temperatura	Efeito da pressão	Efeito teórico combinado	Efeito prático combinado
<i>Interceptação</i>	nenhum	nenhum	nenhum	nenhum
<i>Inércia</i>	adverso	pouco adverso	adverso	adverso
<i>Difusão</i>	favorável	nenhum	favorável	insignificante

A eficiência total de coleta de um filtro é baseada em modelos simplificados de contato partícula-coletor, e tem sido estudada para filtros rígidos a partir de análises para filtros granulares ou fibrosos (COURY,1983).

A eficiência de coleta de um único coletor é obtida pela soma das contribuições de coleta de cada mecanismo. Os principais mecanismos que dominam a filtração do ar em meios fibrosos são: i) difusional, ii) inercial, iii) gravitacional e iv) interceptação direta. O mecanismo difusional é mais eficiente na filtração de partículas menores que 0,2 μm enquanto os mecanismos inercial, gravitacional e interceptação direta são mais eficientes na filtração de partículas maiores que 2 μm . Desta maneira, a eficiência total de coleta das partículas é admitida como sendo uma combinação de todos os mecanismos (STEFFENS e COURY , 2007). A Figura 1 ilustra os diferentes mecanismos físicos de coleta (adaptado de SPURNY, 1998).

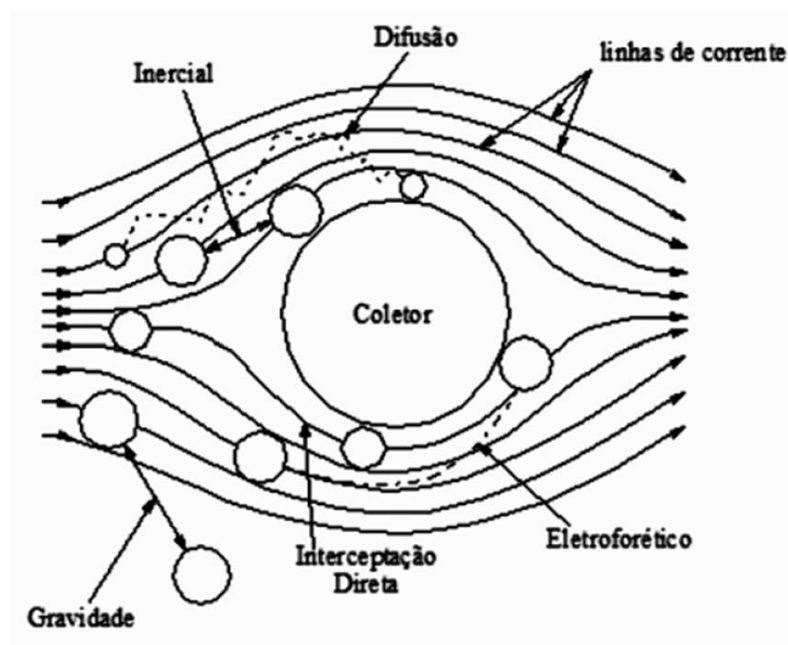


Figura 1: Mecanismos físicos de coleta (adaptado de SPURNY, 1998).

2. 5. PROPRIEDADES MECÂNICAS

A relação entre resistência mecânica e porosidade de cerâmicas porosas tem sido investigada por muitos pesquisadores, e um grande número de modelos tem sido proposto na tentativa de explicar o comportamento mecânico das cerâmicas celulares em função da sua porosidade.

Na maioria das aplicações, os filtros cerâmicos são submetidos a cargas de compressão. Normalmente os materiais cerâmicos apresentam baixa resistência e tenacidade à fratura sendo, desse modo, sensíveis a tensões estruturais.

Para descrever o comportamento mecânico destes materiais, alguns modelos têm sido desenvolvidos. Normalmente, os modelos consideram uma célula unitária para descrever o comportamento do reticulado como um todo e assumem um modo de deformação para os filamentos sólidos. Ainda, considera-se que as condições que levam a célula unitária à fratura,

caracterizada pela ruptura do filamento sólido, são as mesmas para o reticulado como um todo (SALVINI, et. al, 2000).

Para o caso de cerâmicas estruturadas como fibras, os mecanismos que regem a fratura são semelhantes aos descritos para as cerâmicas celulares (SCHEFFLER e COLOMBO, 2005). Os mesmos modelos podem ser aplicados, desde que haja ressalva quanto à definição dos elementos estruturais (arestas, células, espessura das arestas, etc.).

A Equação genérica para a dependência da resistência mecânica com a porosidade é dada pela Equação (7) (WAGH et al., 1991):

$$\frac{\sigma_o}{\sigma_s} = C_1 \left(\frac{\rho_o}{\rho_s} \right)^n \quad (7)$$

Onde, σ_o é a resistência do material poroso, σ_s é resistência da fração sólida, ρ_o/ρ_s é a densidade relativa (ρ_o é a densidade do material poroso e ρ_s é a densidade da fração sólida), C_1 é uma constante relacionada com a forma da célula e o expoente n é uma constante que depende da tortuosidade, como uma medida de desordem no material e está relacionado com a distribuição e geometria da célula. Para $n = 1,5$, a Equação (7) reduz-se ao modelo de Gibson-Ashby para cerâmicas celulares com células abertas, baseado no colapso catastrófico das células num determinado valor de tensão crítica. Nesse caso, n (obtido analiticamente) é derivado de considerações geométricas no cálculo de σ_o (GIBSON et al., 1997 e GIBSON, 2005).

O modelo de Gibson e Ashby foi proposto com base no modelo de resistência de vigas sólidas. Este modelo assume a célula unitária como uma composição geométrica de vigas (arestas sólidas) e leva em consideração os parâmetros estruturais, comprimento da aresta (l) e

espessura da aresta (t), os quais são relacionados com a densidade relativa do material celular (ρ_o/ρ_s), momento de inércia (I) e força aplicada (F) (GIBSON E ASHBY, 1997).

Tipicamente, a curva de tensão-deformação para os materiais celulares (honeycombs e reticulados/espumas) sob compressão é caracterizada por três regimes: linear elástico, patamar de tensão e densificação. No caso das cerâmicas celulares, o regime linear elástico depende do tipo de célula presente na estrutura (células abertas ou fechadas). Se as células são abertas, o regime linear é controlado pela flexão das arestas que compõem as células. No caso de células fechadas, este regime se dá pelo estiramento da face da célula. O patamar de tensão está associado com o progressivo colapso das células, o qual depende da natureza estrutural do material. Nas cerâmicas celulares, este regime acontece por fratura frágil. Na densificação ocorre o colapso das células através do material e subsequente carregamento das arestas e faces das células, uma contra as outras. A Figura 2 exemplifica uma curva tensão-deformação de uma cerâmica com estrutura celular ou fibrosa. Os regimes apresentados estão descritos a seguir.

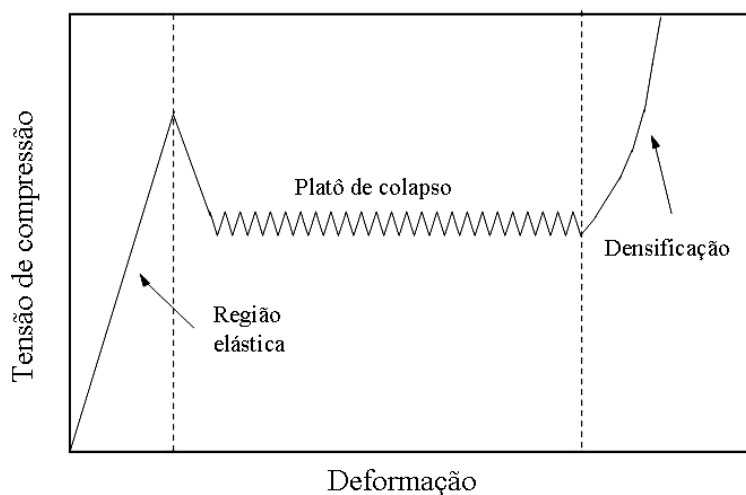


Figura 2: Curva típica de tensão-deformação para de uma cerâmica celular sob compressão.

a) Regime elástico

O regime elástico linear das cerâmicas celulares é caracterizado por um conjunto de módulos, os quais são necessários para descrever a isotropia das mesmas. São eles: módulo de elasticidade (E^*), módulo de cisalhamento (G^*), módulo volumétrico (K^*) e coeficiente de Poisson (ν^*), expressos em função do módulo de elasticidade da aresta celular (E_s) e da densidade relativa (ρ_o/ρ_s). Como foi descrito anteriormente, o regime elástico linear depende do tipo de célula presente na estrutura celular exemplificado na figura 3, como cúbica. Para as cerâmicas celulares com células abertas, o regime linear elástico é controlado pela flexão das arestas. Os módulos de elasticidade (E^*) e cisalhamento (G^*), e coeficiente de Poisson (ν^*) são descritos pelas Equações 8, 9 e 10, respectivamente.

$$\frac{E^*}{E_s} = C_1 \left(\frac{\rho_o}{\rho_s} \right)^2 \quad (8)$$

$$\frac{G^*}{E_s} = C_2 \left(\frac{\rho_o}{\rho_s} \right)^2 \quad (9)$$

$$\nu^* = C_3 \quad (10)$$

Onde: E^* é o módulo de elasticidade do material celular, E_s é o módulo de elasticidade da fração sólida, G^* é o módulo de cisalhamento, ν^* é o coeficiente de Poisson, ρ_o é densidade do material celular, ρ_s é a densidade da fração sólida, C_1 , C_2 e C_3 são constantes de proporcionalidade relacionadas com a geometria da célula.

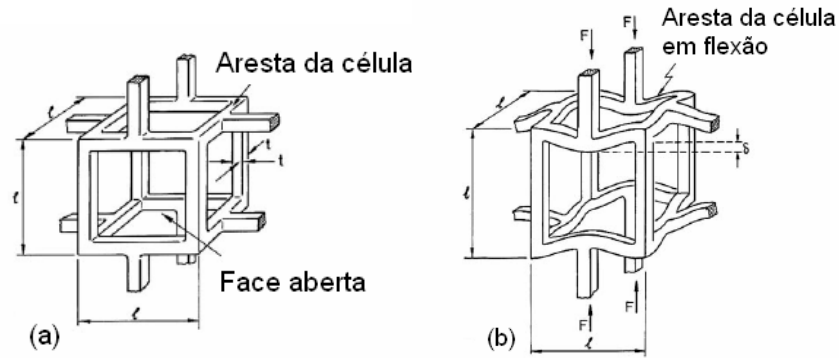


Figura 3: Modelo cúbico para cerâmica celular com células abertas, “l” representa o comprimento da aresta e “t” a espessura da aresta. a) célula não deformada e b) deformação em flexão das arestas durante o regime elástico linear (GIBSON, 2005).

b) Patamar de tensão e densificação

O colapso das cerâmicas celulares com células abertas ocorre através do mecanismo de fratura frágil (Figura 4) e a tensão de ruptura é calculada pela Equação 11:

$$\frac{\sigma_o}{\sigma_s} = C_6 \left(\frac{\rho_o}{\rho_s} \right)^{3/2} \quad (11)$$

onde σ_o é a tensão de ruptura do material celular, σ_s é a tensão de ruptura da fração sólida, ρ_o é densidade do material celular e ρ_s é a densidade da fração sólida.

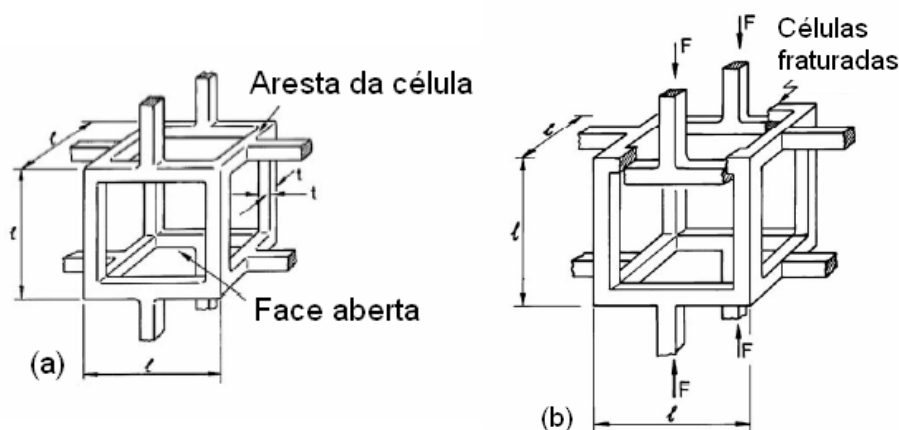


Figura 4: Modelo cúbico para cerâmica celular com células abertas, l representa o comprimento da aresta e t a espessura da aresta. a) célula não deformada e b) colapso das células por fratura frágil (GIBSON, 2005).

Na densificação ocorre o colapso das células por todo o material e subsequente carregamento das arestas das células e faces, umas sobre as outras.

2. 6. APLICAÇÕES INDUSTRIAIS DE SISTEMAS DE LIMPEZA DE GASES QUENTES

Em filtração de gases a temperaturas elevadas, na faixa de 300-900°C, o fluxo do gás do processo de combustão é conduzido através de filtros cerâmicos. A limpeza do gás é exigida para satisfazer às severas normas ambientais impostas pela legislação no controle da emissão de particulados e é descrita a seguir em algumas atividades de importância econômica e ambiental (PASTILA et al., 2001).

Incineração de resíduos domésticos/hospitais/industriais

Grandes centros urbanos têm encontrado como solução para eliminação de resíduos a incineração controlada. A incineração consiste através de duas etapas e tem como objetivo a decomposição térmica dos materiais carbonáceos na ausência de oxigênio (pirólise) ou em sua presença (combustão). As temperaturas variam entre 200 e 600°C na primeira etapa e chegam a 800°C na segunda. Estudos de projetos têm permitido o reaproveitamento energético através de turbinas movimentadas pelo vapor de água aquecido com os gases efluentes (AKITSU et al., 1993). Os subprodutos químicos gasosos e particulados numa planta incineradora são extremamente variados e tóxicos, necessitando de um controle rigoroso. O material sólido convertido é recolhido em filtros cerâmicos.

Craqueamento catalítico/ Indústria de refino

De uma maneira geral, uma refinaria converte óleo bruto em produtos baseados em hidrocarbonetos, variando de gás liquefeito ao coque do petróleo. No craqueamento catalítico fluidizado, óleos hidrocarbonetos de cadeia longa são convertidos a GLP, gasolina, óleos combustíveis e outros. Normalmente o catalisador utilizado é uma zeólita (aluminossilicato cristalino) que é ativada com metais nobres ou alcalino-terrosos. No reator de craqueamento, materiais carbonáceos pesados e coque depositam-se na superfície ativa dos catalisadores, reduzindo sua eficiência. A reativação ocorre em um leito fluidizado, na presença de oxigênio. Os gases efluentes, à temperatura de 700°C, são tratados primariamente em ciclones, que removem todas as partículas maiores que 5 µm. O tratamento final exige um equipamento de maior eficiência, geralmente um filtro cerâmico ou metálico (INNOCENTINI, 1997).

Refino de metais

No refino de metais, resíduos metálicos provenientes de outros processos são reciclados sob pressão atmosférica e temperaturas próximas a 750°C. Misturas de sais como NaCl e KCl são usadas para prevenir a oxidação e absorver as impurezas do metal fundido. A sucata é um exemplo, que dependendo da origem contém plásticos, óleos ou tintas, é fundida em fornos rotatórios na presença desses sais. Durante a calcinação, os resíduos orgânicos liberam compostos sulfúreos e clorados. Metais pesados contidos nos gases efluentes podem servir como catalisadores na formação de dioxinas, substâncias cloradas de alto poder carcinogênico. A remoção dos metais pesados em temperaturas elevadas consegue suprimir a formação de dioxinas, destruir as já formadas, além de permitir a recuperação de energia térmica do processo. A utilização de filtros granulares tem sido a técnica atualmente em uso em diversas plantas industriais, permitindo a operação em alguns casos em temperaturas de até 830°C (PEWKERT e LOEFFLER, 1991).

Geração de Energia Termelétrica

De um modo geral, uma usina termelétrica é constituída de gases sob pressão que movimentam as turbinas geradoras de eletricidade. O calor excedente também serve para aquecer o vapor de água que movimenta turbinas secundárias. Esses gases atingem temperaturas elevadas, são provenientes da gaseificação e combustão de combustíveis orgânicos, geralmente carvão de alto teor calórico. A remoção dos aerossóis ocorre imediatamente antes da entrada nas turbinas, e serve como medida de proteção contra a corrosão (OWEN et al., 1983, LIPPERT et al., 1993).

Combustão de diesel em veículos automotivos

A conversão catalítica dos gases de combustão em veículos automotivos é uma das aplicações mais promissoras em um sistema de gases quentes. Avalia-se que para cada quilograma de combustível queimado, entre 2,7 e 4,3 g de particulados sejam liberados no meio ambiente. As partículas emitidas por motores diesel diminuíram com os avanços tecnológicos, seu tamanho médio é de 10 a 1000 nm (0,01 a 1,0 μm). Estas partículas menores criam riscos à saúde quando aspiradas.

Também se faz necessário o controle dos óxidos do nitrogênio (NO e NO₂, ou NO_x) que são formados, visto que estes contribuem para a poluição atmosférica. Os filtros de exaustão diesel devem não somente reduzir o total das emissões particuladas para níveis muito baixos, mas também devem assegurar que somente uma fração insignificante das partículas muito pequenas consiga passar através do filtro. Esta eficiência deve ser medida pela contagem de partículas e não pela massa de partícula, visto que uma massa muito pequena de partículas com dimensões de 10-100 nm pode representar um número enorme de partículas perigosas (FINLEY et. al, 2006).

As partículas da fuligem são agregados sólidos entre 20 e 60 μm , porém 90% desse material provêm de partículas menores que 300 nm. A composição química varia muito, embora a Agência de Proteção Ambiental americana (EPA) já tenha identificado a presença de mais de 10 mil componentes químicos, a maioria prejudicial à saúde. Especial interesse tem sido dado à presença de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (PHA), que são carcinogênicos e mutagênicos. A fuligem do diesel, além de exercer seu próprio efeito prejudicial à saúde humana, pode adsorver os PHAs, acentuando o potencial tóxico quando inalado.

A completa combustão da fuligem do diesel tem sido possível somente em condições controladas de laboratório. Os sistemas comerciais disponíveis tratam apenas os efluentes

gasosos. A limpeza do material particulado deve ocorrer em temperaturas elevadas, permitindo sua ignição e conversão total. Os principais problemas para a implementação de filtros referem-se à tentativa de diminuir a temperatura de ignição da fuligem, ao modo de evitar a rápida desativação do filtro, e à obtenção um sistema regenerativo que funcione *in-line* no automóvel. O uso de reticulados cerâmicos e filtros do tipo *escoamento cruzado* tem sido sugerido, mas nenhum sistema comercial tem sido 100% efetivo até o momento (FREI, 1990, KOLTSAKIS e STAMATELOS, 1996).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. OBTENÇÃO DOS FILTROS CERÂMICOS

Filtros cerâmicos foram confeccionados a partir de fibras comerciais e caracterizar através de DTA, TGA, difratometria de raios X, picnometria ao He, dilatometria, microscopia eletrônica de varredura análise de imagem. Ensaios de permeabilidade, filtração e resistência mecânica (compressão e flexão) em função da temperatura também foram realizados.

3.1.1 Matérias-primas

As matérias-primas utilizadas neste trabalho foram cedidas pela empresa Tecnotermo. A Durablanket é uma manta de fibra cerâmica resistente, leve e flexível, fabricada a partir de fibras longas Fiberfrax. Estas fibras são multidirecionadas e entrelaçadas num processo contínuo de agulhamento, o que confere ao produto excelente resistência ao manuseio e à erosão. A análise química fornecida pela empresa corresponde em 48% de Al_2O_3 , 51% SiO_2 e 1% de traços inorgânicos.

3.1.2 Obtenção do meio filtrante fibroso

Filtros com estrutura de fibras foram desenvolvidos partindo-se de mantas refratárias sílico-aluminosas comerciais com diferentes composições nominais. Foram utilizadas fibras comerciais com teores de óxidos na faixa de 50% de SiO_2 , 49% de Al_2O_3 , além de conterem traços inorgânicos. As mantas comerciais foram primeiramente trituradas e posteriormente foi adicionado 10% em massa de acetato de polivinila (PVA) como ligante. Este foi escolhido por ser um material de baixo custo e fácil degradação após a queima. As amostras foram então prensadas uniaxialmente utilizando-se matriz de dimensões 50 mm de diâmetro e 10 mm de

altura. Nesta etapa, as amostras foram submetidas a compactações com diferentes pressões de prensagens, de modo a se obter diferentes porosidades. As amostras foram prensadas (Máquinas Hidráulicas SKAY) com pressões de 18, 23 e 30 MPa.

Após a prensagem, as amostras foram submetidas a um tratamento térmico de 500°C durante 1h com taxa de aquecimento de 10°C/min para degradação do polímero (PVA). Em seguida, as amostras foram submetidas a uma etapa de sinterização a temperaturas de 1000, 1200 e 1350°C durante 1 h, o que resultou em uma estrutura fibrosa porosa.

A densidade real das amostras foi determinada através de picnometria ao hélio. A porosidade das amostras foi calculada da relação entre densidade real e densidade geométrica de acordo com a equação (12):

$$\varepsilon = 1 - \left(\frac{\rho_G}{\rho_{He}} \right) \quad (12)$$

Onde ρ_G é a densidade geométrica e ρ_{He} é a densidade picnométrica.

A morfologia e a microestrutura das fibras foram analisadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV). Análise de imagem foi aplicada para a determinação dos principais parâmetros morfométricos das estruturas fibrosas, como detalhado na seção seguinte.

3.2 CARACTERIZAÇÃO

3.2.1 Análise termogravimétrica (ATG)

A composição de alumina e sílica com o ligante (PVA) foi submetida à análise termogravimétrica (ATG, Shimadzu TGA-50) utilizando-se uma velocidade de aquecimento de 10°C/min em ar sintético para determinar a variação de massa.

A análise da decomposição térmica dos materiais anteriormente mencionados foi realizada em um forno tubular, acoplado a um espectrofotômetro Perkin Elmer FT-IR 1600, com o objetivo de analisar os componentes de decomposição.

3.2.2 Análise térmica diferencial (ATD)

As temperaturas de cristalização e fusão do filtro fibroso foram determinadas por análise térmica diferencial (Netzsch, STA 409) em ar sintético a uma velocidade de aquecimento de 10°C/min, em um intervalo de temperatura compreendido entre 25 e 1260°C. Utilizaram-se cadinhos de alumina como porta amostra e material de referência.

3.2.3 Difração de raios X (DRX)

Para a determinação das fases cristalinas presentes na matéria-prima fibrosa, bem como as fases cristalinas formadas após as diferentes condições de tratamento térmico, foi utilizado um difratômetro de raios X modelo Philips PW 3710, utilizando um tubo de cobre (radiação $\text{CuK}\alpha$), potência de 40 kV e 30 mA. As condições de ensaio foram: passo de 0,05°, tempo de passo de 1s e intervalo de medida em 2θ , de 10 a 70°. Para identificação das fases cristalinas formadas utilizou-se o banco de dados JCPDS.

3.2.4 Análise de Dilatometria

A dilatometria consiste basicamente em medir as variações dimensionais de um corpo de prova aquecido à velocidade constante em função da temperatura, tanto em atmosfera ambiente (ar) como em atmosfera controlada. Neste trabalho foi utilizado um dilatômetro ótico de marca Misura HSM-ODHT para determinação do coeficiente de expansão térmica dos elementos

filtrantes. As condições de ensaio foram: taxa de aquecimento 50°C/min até a temperatura de 1600°C, sem tempo de patamar.

3.2.5 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A morfologia das fibras dos filtros cerâmicos foi analisada por microscopia eletrônica de varredura (Philips, modelo XL-30). As amostras na forma compacta foram dispostas sobre uma fita de carbono e recobertas com uma fina camada de ouro. As micrografias foram tiradas num aumento de 200 vezes utilizando-se elétrons secundários, para informações de topografia e elétrons retroespalhados, para contraste de número Atômico (para ser utilizada na análise de imagem). Foram aplicadas análises de EDX nas fibras a fim de obter sua composição química.

3.2.6 Análise de imagem e microtomografia computadorizada (μ -CT)

Para a determinação dos parâmetros morfológicos (porosidade, tamanho de poro e diâmetro da fibra) por análise de imagem, os corpos de prova foram inicialmente embutidos a vácuo com resina poliéster (*Fiber glass*). Após as etapas de lixamento e polimento, as mesmas foram analisadas no MEV com aumento de 200 vezes, utilizando-se elétrons retroespalhados. Foram obtidas imagens de 6 regiões representativas de cada amostra, num total de 5 amostras. As micrografias foram processadas utilizando-se o software análise de imagem IMAGO[®], o qual foi desenvolvido no Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas (LMPT), Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina em associação com Engineering Simulation and Scientific Software LTDA, ESSS. Inicialmente, as imagens foram transformadas em escala de cinza e então binarizadas.

Outros parâmetros morfológicos (*Structure Model Index*, SMI, densidade de conectividade, CD e grau de anisotropia, DA) foram determinados através de microtomografia computadorizada de raios X (μ CT-40, Scanco Medical AG, Bassersdorf, Suíça). Foi utilizado um tubo de raios X equipado com alvo de tungstênio, operando a 50 kV e 80 μ A com comprimento de onda de 0,024 nm. As amostras foram escaneadas nas direções x-, y- e z-, com resolução isotrópica nominal de 37 x 37 x 38 μm^3 . Uma linha de sensores CCD (dispositivo de carga acoplado) foi utilizada para detectar a intensidade transmitida através da amostra. Tanto a fonte de raios X como o detector possuía colimadores tipo fenda. O objeto foi rotacionado a 360° com um passo por grau e os dados foram armazenados como senogramas. Uma descrição detalhada da caracterização de estruturas celulares por tomografia computadorizada foi descrita por Zeschky et al., (ZESCHKY et al., 2005).

3.2.7 Ensaio de compressão e flexão

Para os ensaios de resistência mecânica sob compressão a temperatura ambiente, foram utilizados pelo menos 10 corpos de prova com dimensões nominais de 13 x 10 x 7 mm, utilizando-se uma máquina de ensaios universal (Instron, Model 4204). A velocidade de carregamento aplicada foi de 1 mm/min. As superfícies dos corpos de prova ortogonais à aplicação da carga de compressão foram cobertas com uma borracha rígida. Esse procedimento é recomendado para eliminar efeitos de carregamento localizado, devido a variações topográficas da superfície das amostras. Os ensaios de resistência à flexão foram realizados no laboratório do Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Para os testes de resistência mecânica por flexão a 4 pontos foram utilizados pelo menos 10 corpos de prova com dimensões de 60 x 20 x 7mm realizadas a temperatura ambiente, a 800°C e a 1000°C usando uma máquina de teste de materiais (Z2.5/TS1S-2004, Zwick/Roell)

com um forno adaptado. A velocidade de carregamento foi de 1 mm/min. Os testes foram realizados com carga perpendicular a orientação das fibras.

3.2.8 Testes de permeabilidade e filtração a altas temperaturas

A avaliação da permeabilidade bem como eficiência de coleta foram realizadas no Departamento de Engenharia Química da UFSCar- São Carlos. A Figura 5 mostra um desenho esquemático do equipamento que foi utilizado para os testes de permeabilidade e de filtração a altas temperaturas. O filtro fibroso é inserido num invólucro cilíndrico de aço refratário. O ar é alimentado de baixo para cima, de tal modo que, no caso de filtração, a camada de material depositado na entrada do filtro possa ser eliminada com a aplicação de um pulso reverso, cuja frequência e duração são programadas no controlador da válvula solenóide.

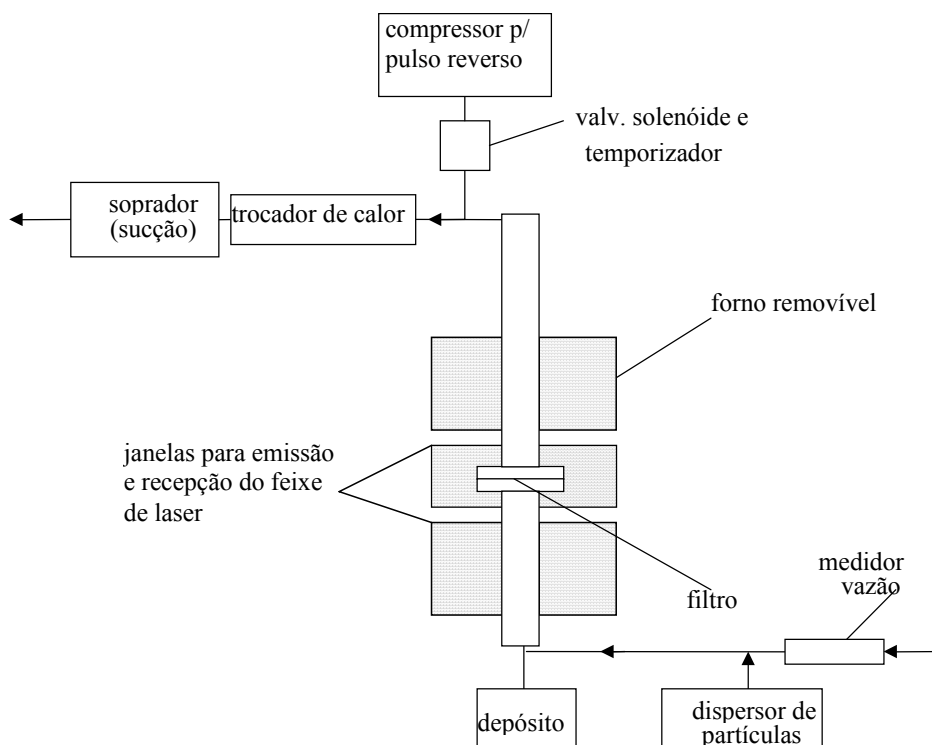


Figura 5: Esquema do equipamento a ser utilizado nos testes de permeabilidade e filtração.

Os testes de permeabilidade foram efetuados a diferentes temperaturas, (temperatura ambiente a 700 °C) medindo-se a queda de pressão em função da velocidade de escoamento no filtro. O equipamento consistiu de um soprador (7,5 HP) que fornecia a vazão de ar necessária ao experimento; um rotâmetro para medir vazão máxima de até 40 l/min; um micromanômetro (FCO14, Furness Control) para medir a perda de carga antes e depois do filtro; um forno (Maitec) conectado a um controlador de temperatura do tipo PID (Flyever); termopares Tipo K localizados na entrada e na saída próximos à amostra, sendo a leitura da temperatura feita em um leitor de temperatura (SK5, Salcas); um permeâmetro dividido em duas seções cilíndricas, confeccionadas em aço refratário, entre as quais foi acoplado uma porta amostra cilíndrica, também de aço refratário.

Os filtros foram dispostos no porta-amostra entre as seções cilíndricas e vedadas de forma a evitar escoamento radial. O diâmetro efetivo de escoamento foi de 3 cm.

Os ensaios consistiram na passagem de ar, através do elemento filtrante onde se mediram os valores da pressão e da temperatura na entrada e saída da amostra, para cada vazão estabelecida. O ar atravessou a amostra verticalmente no sentido ascendente. Para cada amostra foram feitas tríplicas das curvas experimentais da queda de pressão em função da velocidade. As constantes de permeabilidade k_1 e k_2 experimentais foram obtidas pelo ajuste dos dados através da Equação (2).

Os testes de filtração utilizaram um alimentador de pó, o qual foi disperso no gás. Utilizou-se como dispersor um alimentador de pó em leito fluidizado TSI-2300.

Para se avaliar a eficiência de filtração do pó, foi necessário medir a concentração e a distribuição granulométrica do material na corrente gasosa de entrada e saída do sistema. As medidas foram realizadas utilizando-se um analisador a laser, não intrusivo, em que o receptor e

o transmissor são colocados externamente ao conjunto e o feixe de laser atravessa o fluxo gasoso por janelas colocadas antes e depois do leito.

Para os testes de filtração, o equipamento utilizado consistiu de uma linha de ar comprimido, o gerador do tipo leito fluidizado (TSI-2300), um medidor de vazão (rotâmetro) e a câmara de ensaio.

A filtração foi realizada verticalmente em sentido ascendente. As partículas na entrada e na saída do filtro foram quantificadas por meio de contador de partículas Haic/Royco Modelo 5230, que conta o número de partícula em dez faixas de tamanho entre 0,5 e 20 μm . Por meio da densidade do material particulado e o número de partículas na entrada e na saída do filtro, foi possível obter as massas de partículas (M_e e M_s), por faixa de tamanho.

O material particulado utilizado neste experimento foi um concentrado fosfático de Patos de Minas, com densidade de 2,97 g/cm^3 . A eficiência de coleta experimental, por faixa granulométrica (E_i), foi determinada pela equação 13:

$$E_i = \frac{N_{e,i} - N_{s,i}}{N_{e,i}} \cdot 100\% \quad (13)$$

onde, $N_{e,i}$ é número de partículas com diâmetro dp_i na entrada do filtro; $N_{s,i}$ é número de partículas com diâmetro dp_i na saída do filtro, i é a faixa analisada.

O ensaio foi realizado em duas etapas, a fim de obter o número de partículas na saída do filtro e o número total de partículas de entrada no filtro, por faixa de tamanho.

A Tabela II apresenta as características dos filtros cerâmicos fibrosos e as condições de operação utilizadas nos ensaios de filtração.

Tabela II: Características físicas do material particulado e condições de operação dos ensaios de filtração.

Filtro Cerâmico Fibroso	
Porosidade (ϵ)	0,50 0,65 e 0,73
Espessura (mm)	9-12
Fluido	Ar
Material Particulado	Rocha Fosfática
Diâmetro Médio Partícula (μm)	4,6
Densidade da Partícula (g/cm^3)	2,97
Velocidade de Filtração (m/s)	0,05
Material Particulado (g/m^3)	0,017
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	25; 300; 700

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA

A manta alumino-silicosa como-recebida possui porosidade de aproximadamente 96%. A Figura 4 apresenta o gráfico da porosidade das amostras em relação à pressão de prensagem. Pode-se observar que quanto maior a prensagem menor a porosidade. Os dados obedecem um comportamento aparentemente linear, como evidenciado pelo ajuste apresentado. Pode-se notar que para pressão de prensagem igual a zero ($P=0$), o valor da porosidade vai a 97%, o que se aproxima do valor inicial do material fibroso. Com esse resultado é possível obter, dentro de limitações, uma porosidade desejada, em função da pressão de compactação.

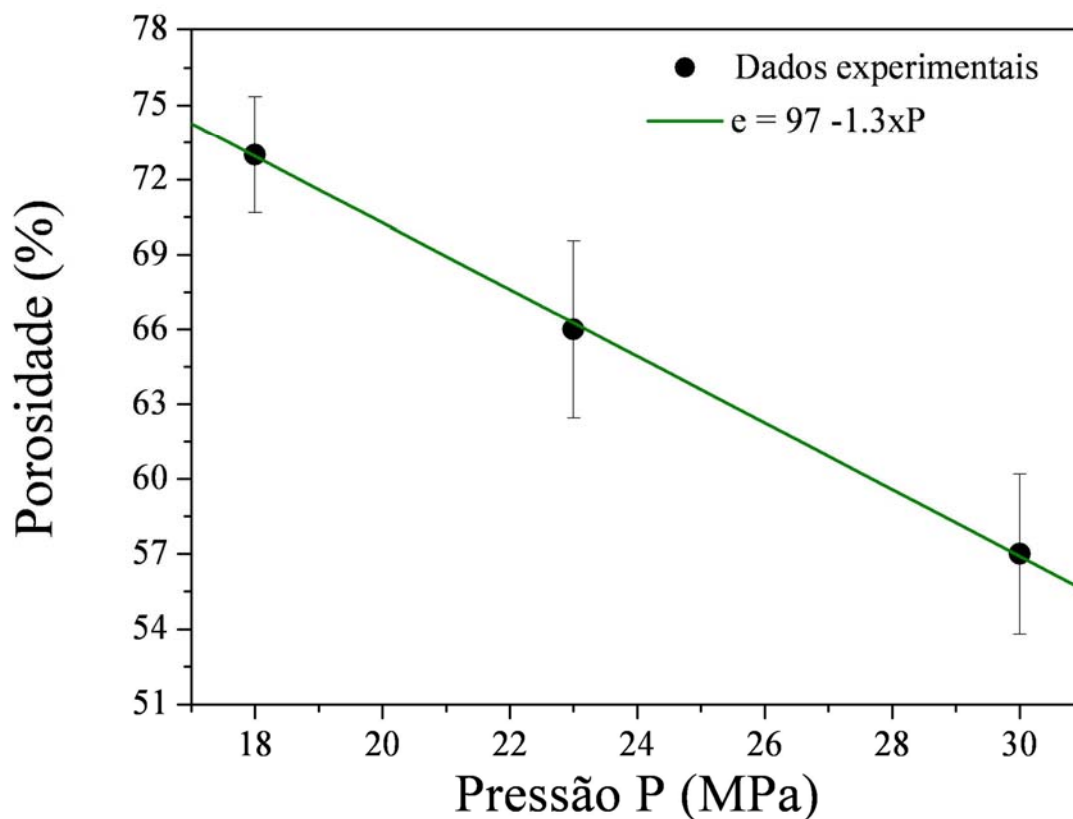


Figura 6: Gráfico da porosidade das amostras em relação à pressão de prensagem.

O comportamento térmico do material fibroso pode ser observado na curva de análise térmica diferencial mostrada na Figura 7.

Durante o processo de sinterização, a perda total de massa das fibras comprimidas foi de aproximadamente de 6%, que corresponde principalmente à degradação do PVA em carbono (corresponde ao primeiro pico da curva), em sequência a oxidação do carbono CO e CO₂ liberando entre 250°C e 500°C (segundo pico da curva). Um pico exotérmico bem definido pode ser visto na curva de DTA em 995°C, que é atribuído à cristalização da mulita (JAYMES et, al., 1997).

Observa-se no mesmo gráfico a curva TG do material fibroso. Pela análise da curva, observam-se três estágios de perda de massa, sendo o primeiro de 0,5% que corresponde à perda de água na amostra em torno de 100°C e os dois estágios seguintes de 3,0% e 2,5%, correspondem à degradação e liberação de voláteis do polímero às temperaturas de 238°C e 416°C, respectivamente.

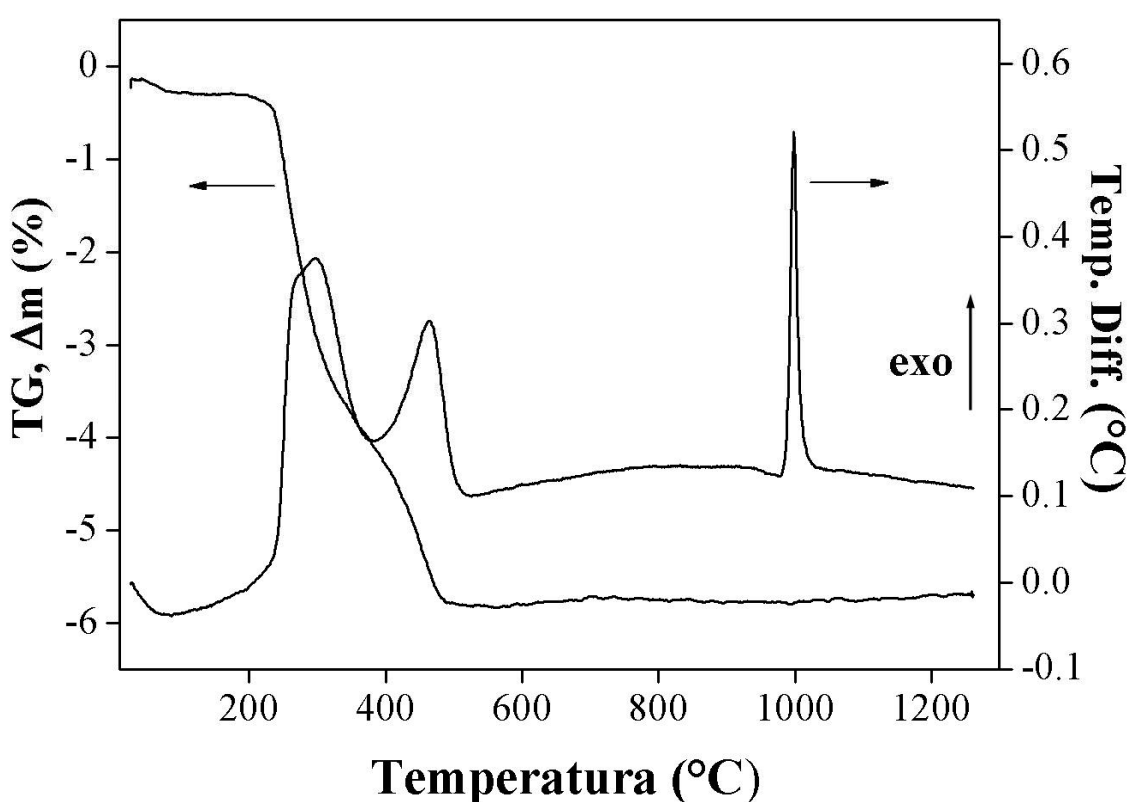


Figura 7: Curva de análise térmica diferencial e análise termogravimétrica (ATG) do material fibroso, indicando as temperaturas de cristalização e degradação do PVA. Velocidade de aquecimento 10°C/min em ar sintético.

A Figura 8 apresenta os difratogramas de raios X dos filtros fibrosos em diferentes temperaturas de sinterização. Observa-se que a amostra de fibras de aluminossilicato como

recebida e a amostra sinterizada a 500°C apresentam apenas fase amorfa. Com o aumento da temperatura, acima de 1000°C ocorreu a formação de mulita ($3\text{SiO}_2 \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$), como fase predominante até 1350°C, apresentando fase residual de sílica amorfa (halo em torno de $2\theta = 20^\circ$).

De acordo com a curva de DTA da Figura 7, a cristalização da mulita para os sistemas amorfos $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ do sistema ocorre em aproximadamente 1000°C.

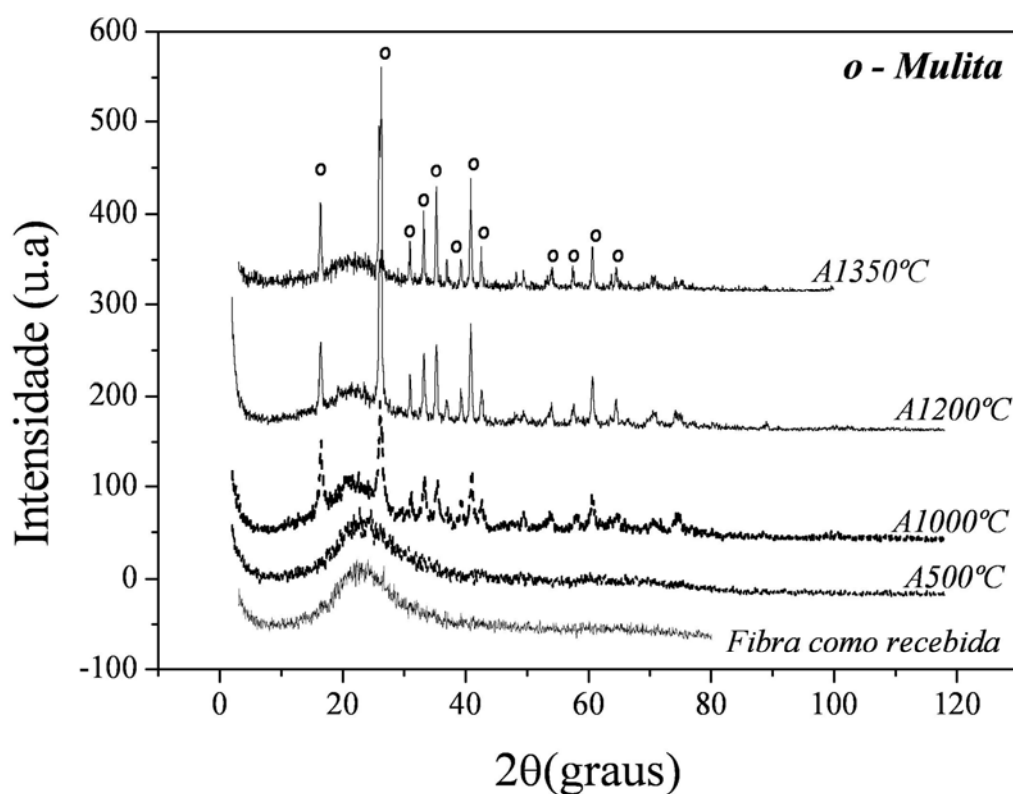


Figura 8: Difratoograma de raios X dos filtros fibrosos em diferentes temperaturas de sinterização.

A Figura 9 apresenta os gráficos de dilatometria das amostras sinterizadas a 1200°C. Todas as amostras apresentaram dilatação linear até a temperatura de aproximadamente 1300°C, onde ocorre a formação de fase líquida, crucial para sinterização das fibras. As amostras

apresentaram um coeficiente de expansão térmica linear α (25-325°C) na faixa de $3,75-4,25 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. A amostra com maior porosidade apresentou uma dilatação ligeiramente maior que a amostra com menor porosidade, provavelmente devido ao maior espaço inter-fibras, que promoveu uma maior acomodação das fibras. Isto pode ser um indicativo que os filtros com maior porosidade tendem a coalescer (aumentar o diâmetro da fibra) diminuindo a porosidade superficial da amostra.

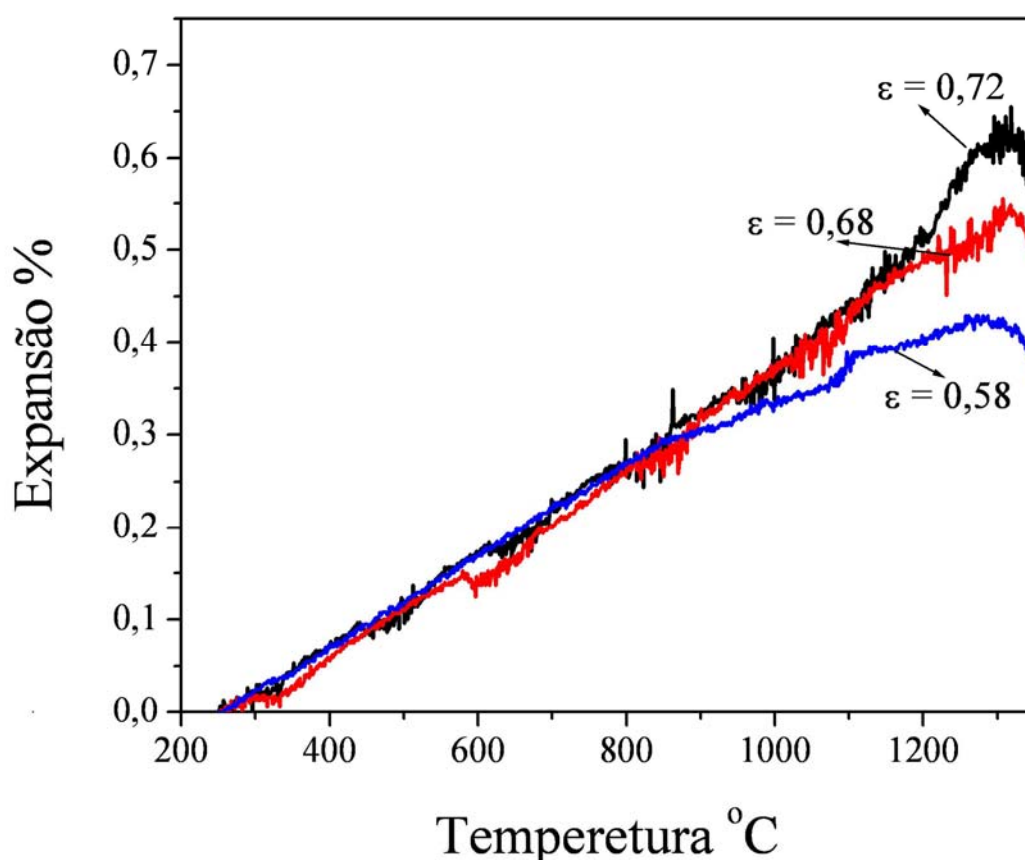


Figura 9: Curvas de dilatométrica dos filtros fibrosos com diferentes porosidades.

A Figura 10 apresenta micrografias obtidas por MEV das fibras não sinterizadas e dos filtros fibrosos sinterizados por 60 minutos em diferentes temperaturas. As fibras comerciais são

formadas por fibras cerâmicas com diferentes diâmetros ($4\text{ }\mu\text{m}$ - $8\text{ }\mu\text{m}$) e comprimentos maiores que $20\text{ }\mu\text{m}$ (Figura 10a). Durante o processo de prensagem, ocorreu a fratura das fibras, e, conseqüentemente uma redução no seu comprimento. Após a prensagem e o aumento da temperatura para 750°C , os filtros apresentaram uma morfologia fibrosa mais densa que as respectivas mantas comerciais, formando uma malha de fibras cerâmicas entrelaçadas, isotropicamente distribuídas. Observa-se que essa rede de fibras forma uma rede interconectada de vazios (poros) (Figura 10c). Com o aumento da temperatura para 1000°C , observa-se um aumento na densidade relativa das malhas fibrosas (Figura 10b). Esse aumento não foi significativo após o aumento da temperatura de sinterização para 1200°C . Não foram observadas mudanças no diâmetro das fibras, tampouco na sua composição.

Entretanto, o comprimento das fibras diminuiu substancialmente para temperatura de sinterização de 1200°C e ambas as amostras apresentaram uma densificação da estrutura (Figura 10d). Fibras de menor comprimento dos elementos filtrantes sinterizados a 1200°C formam uma rede de poros com tamanhos menores, apesar da maior densificação aparente, o que explica o aumento da porosidade total do material após a sinterização.

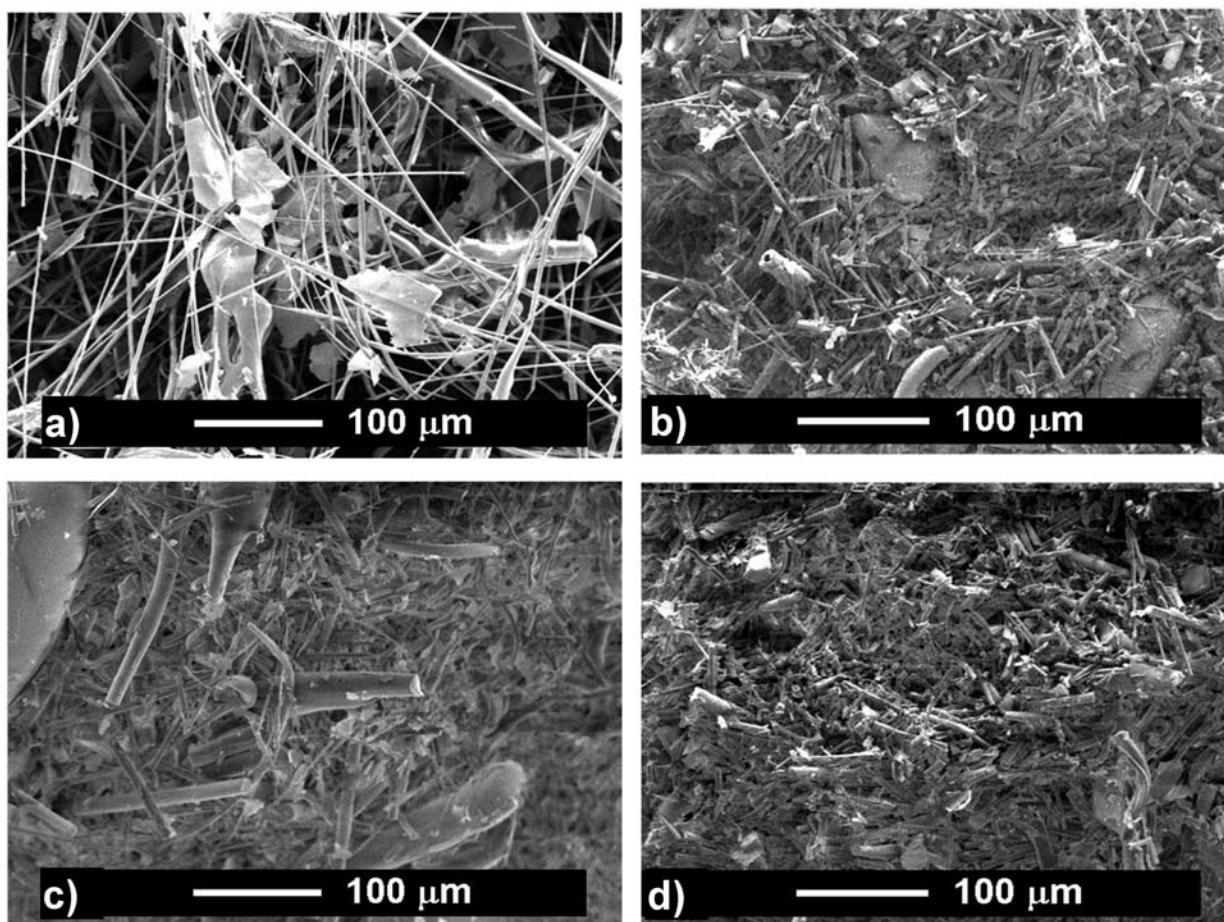


Figura 10: Microestrutura dos filtros fibrosos: a) amostra como recebida, b) 1000°C, c) 750°C e d) 1200°C sinterizados por 60 minutos.

A Figura 11 apresenta micrografias obtidas por MEV do material fibroso como recebido (manta refratária com 96% de porosidade) e dos filtros fibrosos sinterizados por 60 min a 1200°C com diferentes porosidades. A Figura 11a apresenta a micrografia do material fibroso como recebido, mostrando uma rede de fibras longas interconectadas, arranjadas anisotropicamente com diâmetro da fibra (ϕ) distribuído na faixa entre 1 μm e 100 μm . Com a diminuição da porosidade a superfície da amostra torna-se notavelmente mais densa. Isto pode ser observado na amostra com 73% de porosidade na Figura 11b. Em amostras com menores porosidades, estas diferenças morfológicas não são observadas Figura 11c. Observa-se que, com o aumento da

pressão de prensagem em duas vezes, as fibras tendem a se orientar no plano perpendicular à força de prensagem e a quantidade de fibras finas e longas diminui tornando a estrutura ainda mais densa Figura 11d.

Antes do tratamento térmico, os filtros são compostos de extensas fibras com diferentes diâmetros. Durante o tratamento térmico ocorreu a formação de uma fase líquida de SiO_2 com subsequente encurtamento das fibras, originando partículas arredondadas (globulares), distribuídas entre o material fibroso (seta na Figura 11b). Esse comportamento é característico da síntese de fibras de mulita, a partir da devitrificação de fibras alumino-silicosas amorfas (DYSON et al., 1997). Esse tipo de morfologia tem início nas pontas das fibras e está relacionado à diminuição da área de superfície por unidade de volume, fazendo com que a fibra cilíndrica tendo a adquirir um formato esférico.

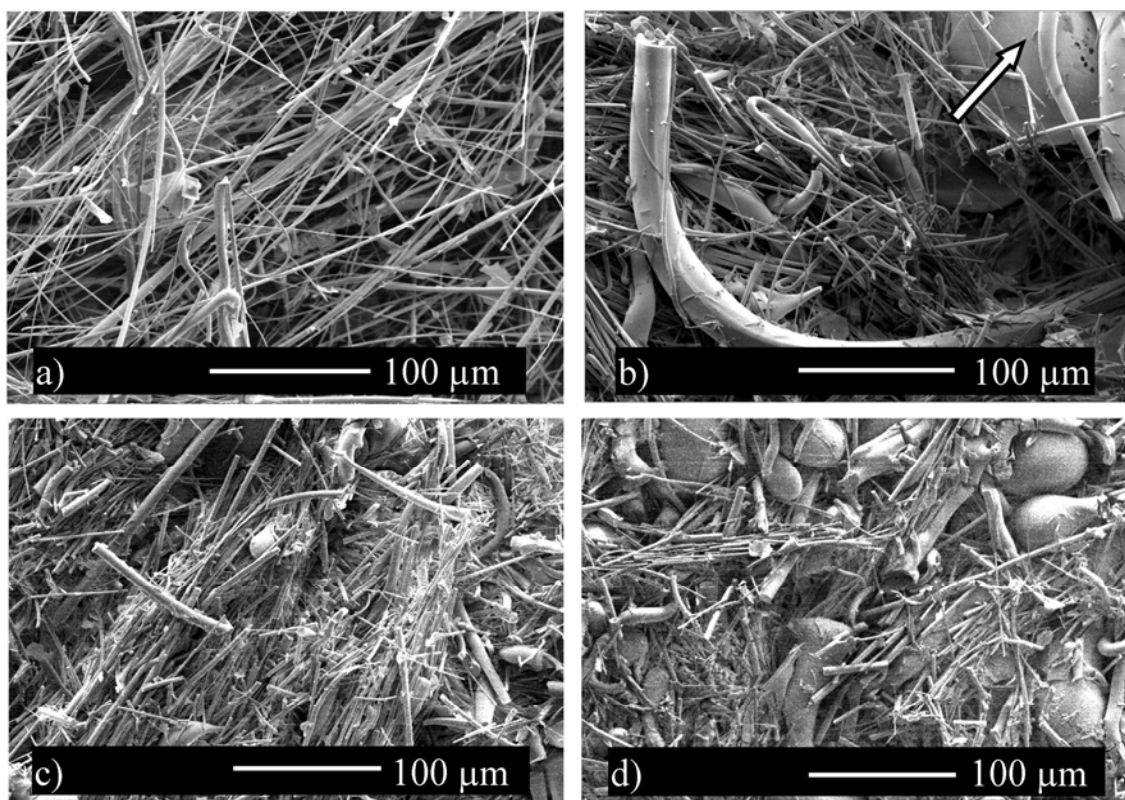


Figura 11: Micrografia dos filtros fibrosos com diferentes porosidades tratados por 60 minutos a 1200°C: a) fibra como recebida; b) 73%; c) 65%; d) 50% de porosidade.

A análise química por EDX, mostrada na Figura 12, revelou um teor maior de SiO_2 na superfície dessas partículas (Figura 12a), em comparação com a superfície das fibras Figura 12b, o que indica que a fase líquida formou-se na superfície. A presença desse tipo de morfologia aliada à ampla distribuição do tamanho da fibra pode contribuir para acentuar a eficiência de coleta de partículas, visto que diferentes mecanismos de filtração atuam dependentes do tamanho de partícula a ser coletada (FREITAS et al., 2006 e LATELLA et al., 2006).

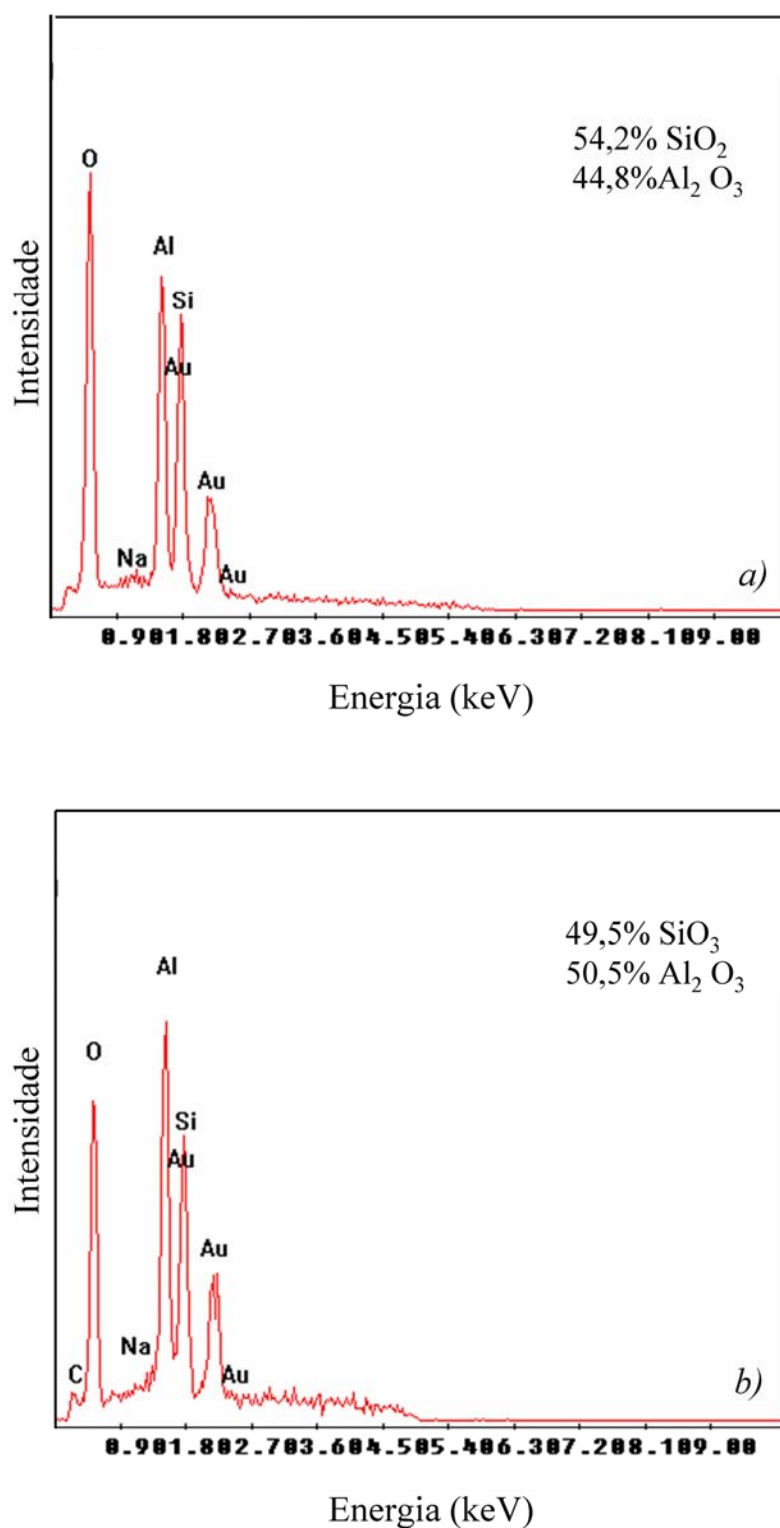


Figura 12: Análise química por EDX apresentando os principais constituintes dos filtros fibrosos: a) da superfície da partícula e b) da superfície da fibra.

A Figura 13 apresenta micrografias obtidas por MEV do material como recebido e dos filtros fibrosos sinterizados durante 60 min a temperatura de 1350°C com diferentes porosidades. A Figura 13a apresenta a micrografia do material fibroso como recebido (porosidade de 96%). Pode-se observar que com o aumento do tratamento térmico para 1350°C não ocorreram diferenças significativas na microestrutura das amostras com porosidade de 65% e 57% comparadas com as amostras sinterizadas a 1200°C. Com o aumento da temperatura para 1350°C pode-se observar que ocorreu o coalescimento (o arredondamento nas pontas das fibras) como visto na Figura 13b. O aumento da temperatura favorece o mecanismo de coalescimento nas pontas das fibras que gera as partículas globulares para todas as porosidades.

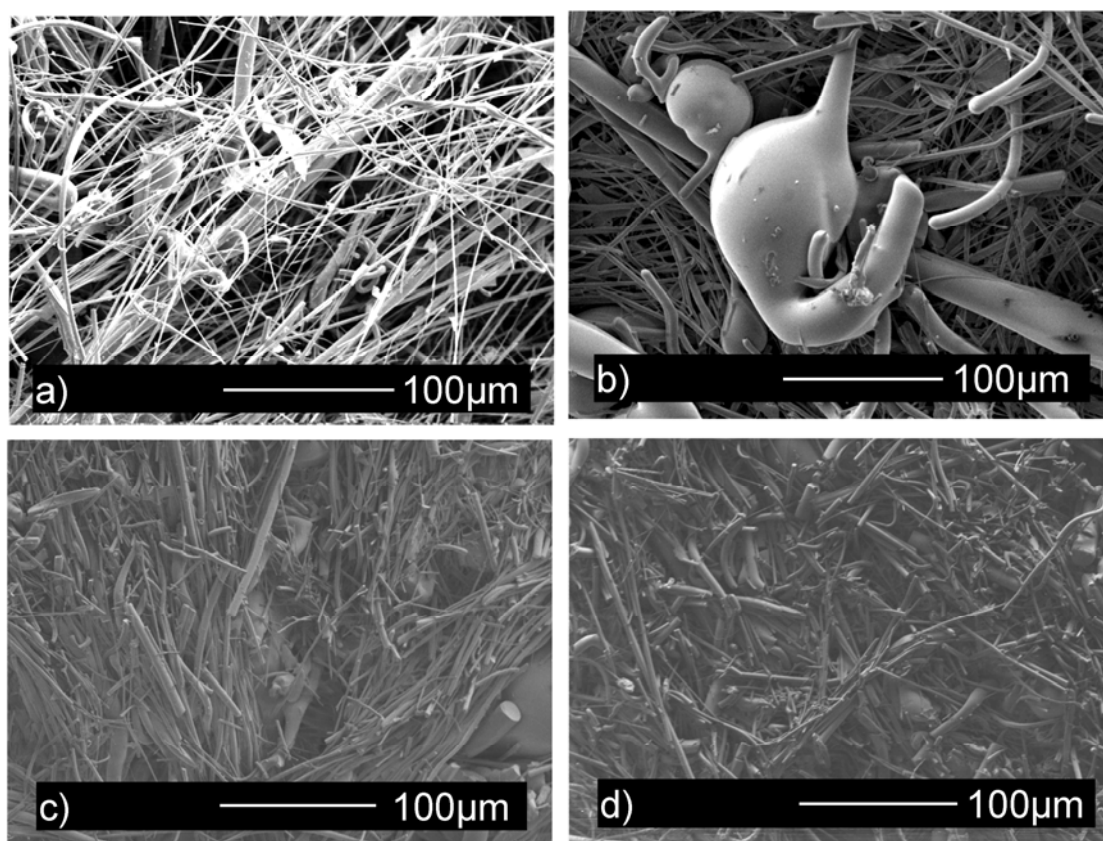


Figura 13: Micrografia dos filtros fibrosos sinterizados a 1350°C com diferentes porosidades; a) como recebida com 95% de porosidade, b) 75%, c) 65% e d) 57%.

4.2 ANÁLISE DE IMAGEM

A Figura 14 apresenta as micrografias obtidas por MEV das amostras embutidas para os filtros fibrosos com diferentes porosidades e diferentes tratamentos térmicos.

Com estas imagens e através do programa IMAGO, pode-se prever alguns parâmetros morfométricos como: porosidade, porosidade superficial, distribuição do tamanho de fibra e tamanho médio de poro, que caracterizam a morfologia dos filtros. Observa-se nas figuras embutidas para o tratamento de análise de imagem, que os filtros apresentaram diferentes porosidades. Pode-se observar ainda que quanto menor a porosidade maior a orientação das fibras. Isto pode ser observado através das Figuras 14a e 14c que apresentam menores valores de porosidade.

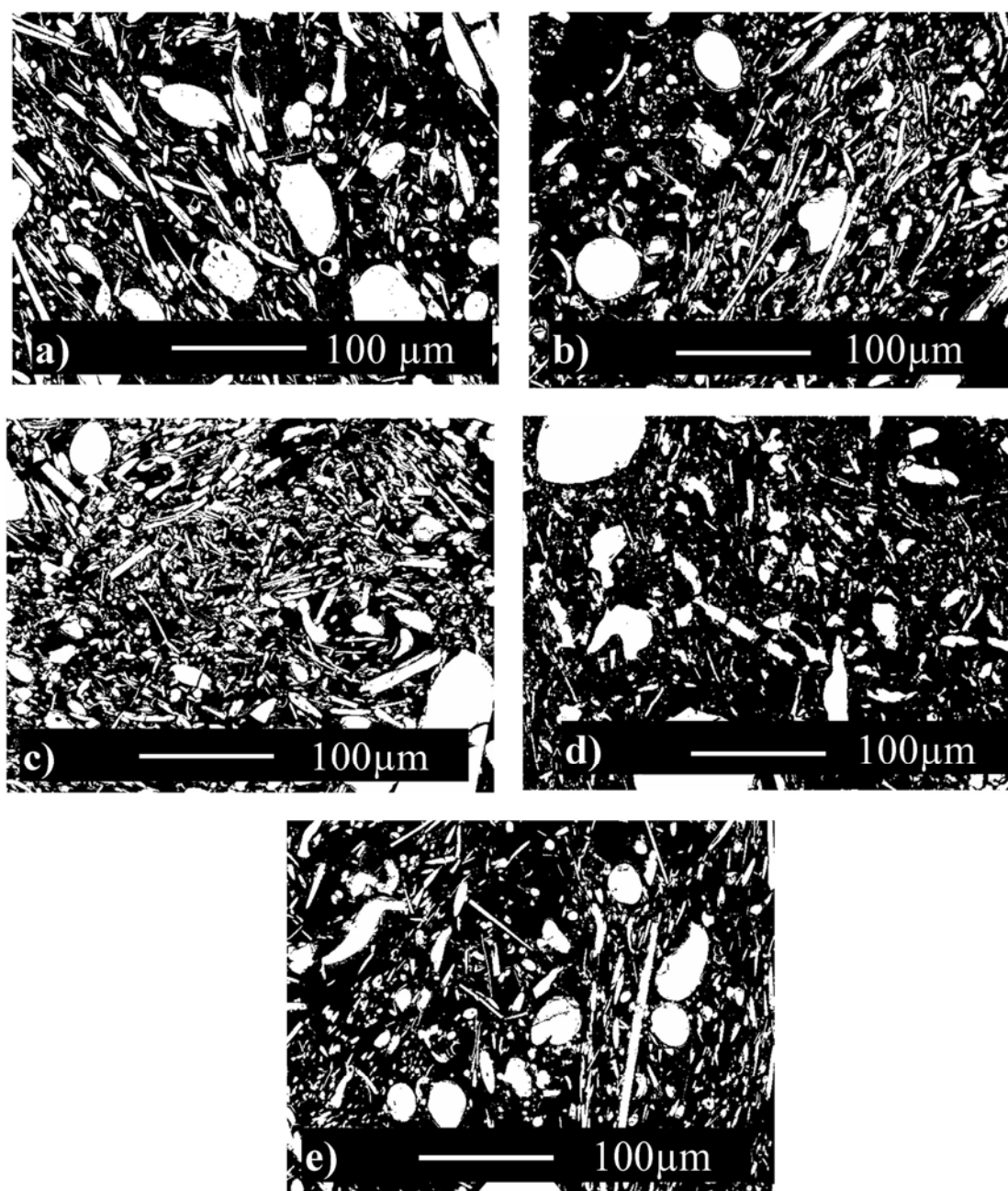


Figura 14: Micrografia dos filtros fibrosos obtidas por MEV sinterizados por 60 minutos com diferentes porosidades; a) 57%, b) 65% sinterizados a 1350°C, c) 57%, d) 66% e e) 73% sinterizados a 1200°C.

A tabela III apresenta a porosidade dos filtros cerâmicos fibrosos obtida por duas diferentes técnicas: relação entre densidade geométrica e densidade real (porosidade aparente), análise de imagem utilizando o software IMAGO[®] (aplicado a micrografias de amostras embutidas e polidas).

O valor de porosidade dos filtros fibrosos produzidos em diferentes condições de prensagem variou entre 57-73% e entre 56-72%, para medidas de porosidade geométrica e através do IMAGO[®], respectivamente. Para as medidas de porosidade superficial, foram utilizadas micrografias de amostras não embutidas para melhor análise. Estes resultados de porosidade superficial poderão ajudar a explicar os resultados de eficiência de coleta apresentados na seção 4.5, visto que a porosidade superficial do filtro pode influenciar o mecanismo de filtração.

Observa-se, ainda na Tabela III que a amostra com maior porosidade aparente apresentou menor porosidade superficial. Isto pode ser explicado pela presença de partículas arredondadas oriundas do coalescimento do material fibroso durante a sinterização como descrito anteriormente.

Por análise de imagem obtiveram-se resultados bem semelhantes de porosidade quando comparada com a porosidade calculada a partir da relação entre a densidade geométrica e densidade real para as mesmas amostras. A etapa de binarização (escolha do *thresholding*) é uma etapa crítica da técnica de análise de imagem, pois nessa etapa se determina o ponto de separação entre a fase sólida e a fase de vazios. Como as informações são obtidas a partir de uma amostra previamente preparada, muitas vezes detalhes observados visualmente na amostra não são considerados pela análise de imagem, levando assim a uma perda de informações.

Tabela III: Porosidades obtidas através de diferentes técnicas.

Amostra	P_{ap} (%)	P (%) - imago	P (%) superficial
1 (1200°C)	57	56,7 ± 4,03	19,91 ± 2,21
2 (1200°C)	66	63,1 ± 1,54	23,66 ± 1,61
3 (1200°C)	73	72,9 ± 2,04	15,72 ± 1,07
4 (1350°C)	57	60,7 ± 1,96	19,25 ± 0,41
5 (1350°C)	65	64,7 ± 1,44	25,69 ± 0,03

Os diâmetros de fibra das amostras variam de 1-140 μm , sendo que as fibras com diâmetros menores (5-10 μm) apresentaram maior frequência, para as duas temperaturas de sinterização. Pode-se ainda observar que o diâmetro médio de fibra não apresentou variações significativas após sinterização tanto para 1200°C quanto para 1350°C, embora uma quantidade maior de fibras mais espessas esteja presente na amostra sinterizada a 1350°C. Isso pode ser atribuído a variações na morfologia das fibras após sinterização a 1350°C, como evidenciado na Figura 15. Entretanto, algumas variações morfológicas podem ser notadas, como o encurvamento de algumas fibras e a formação de glóbulos a partir das extremidades das fibras, devido ao amolecimento causado pela fase líquida.

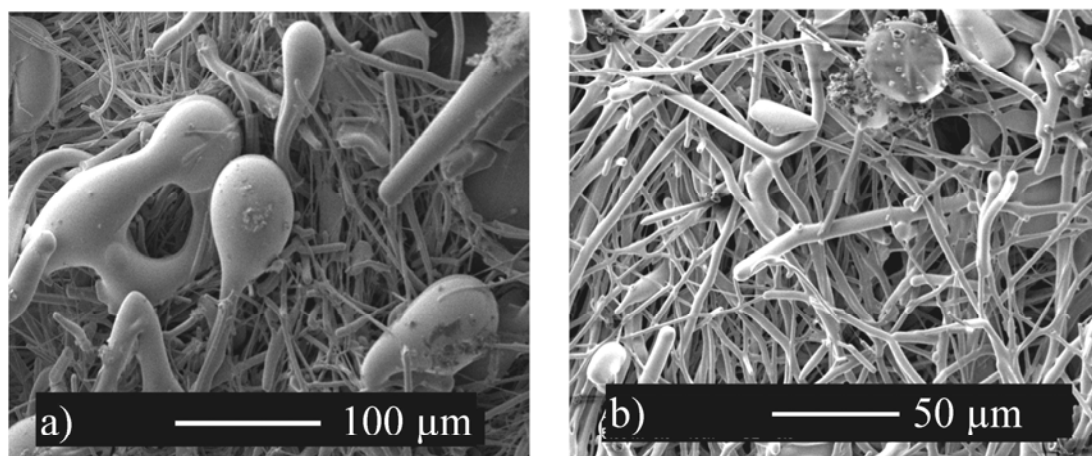


Figura 15: Micrografia dos filtros fibrosos sinterizados a 1350°C com 73% de porosidade.

A partir da análise de imagem foi também possível determinar o diâmetro médio de fibra e o tamanho médio de poro dos filtros cerâmicos fibrosos como visto na Figura 16. O tamanho médio de fibra variou na faixa de 2 – 4 μm.

Nos filtros sinterizados a 1200°C observou-se que houve uma pequena diferença no diâmetro médio de fibra nos filtros com porosidades de 65 e 73% conforme observado na Figura 16. Esse aumento pode estar relacionado com a expansão linear térmica do material poroso como mencionado anteriormente.

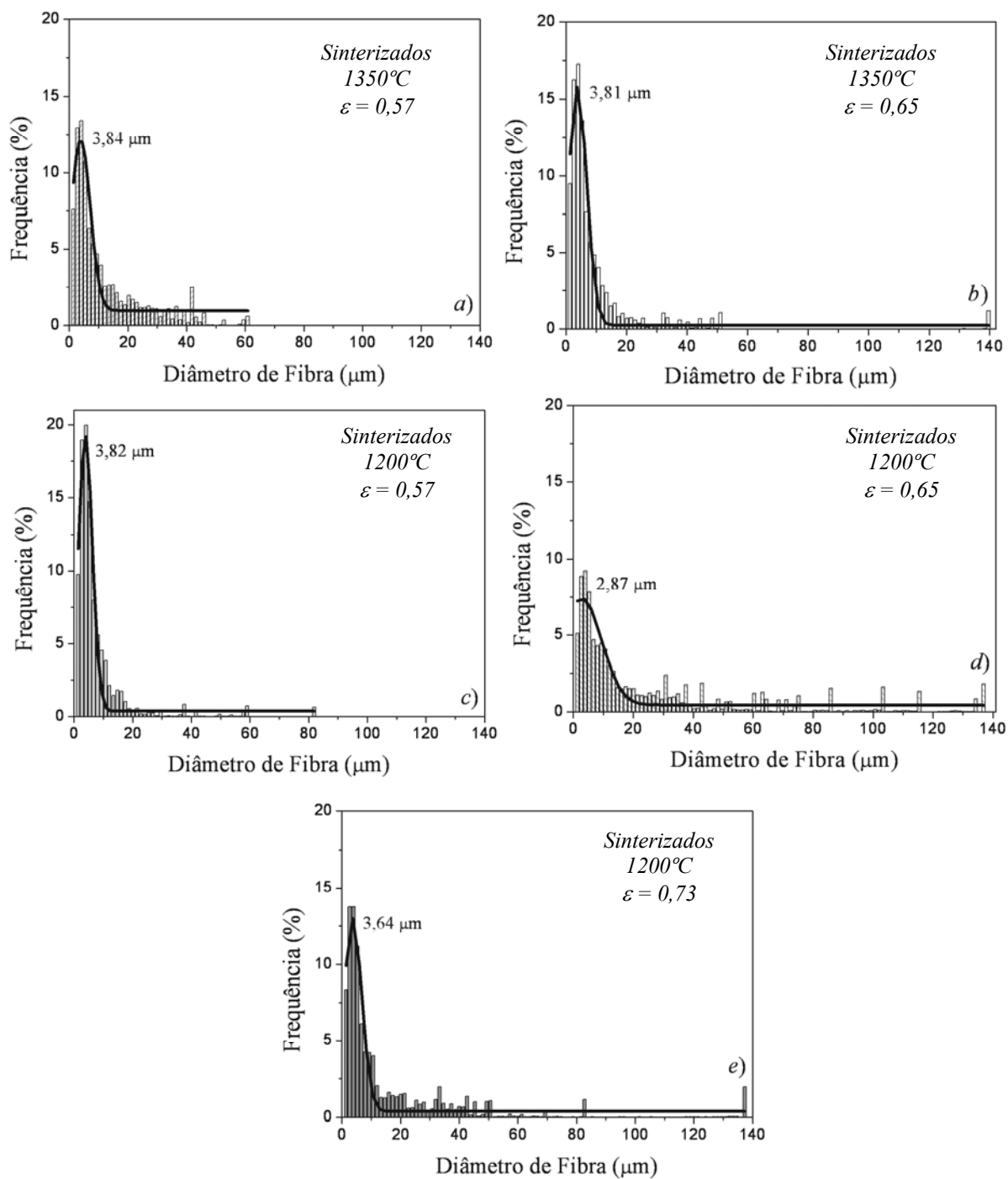


Figura 16: Distribuição de diâmetro de fibra dos filtros fibrosos.

Com esta mesma análise também foi possível determinar o tamanho médio de poro dos filtros cerâmicos fibrosos como visto na Figura 17. O tamanho médio de poro variou numa faixa de 7-10 μm . Observa-se, ainda, que o tamanho médio de poro aumentou com o aumento da porosidade para temperaturas de sinterização de 1200°C, estando de acordo com o método de processamento; quanto maior a pressão de prensagem das amostras, menor a quantidade de espaços inter-fibras.

Já para a temperatura de 1350°C não ocorreu um aumento significativo. Este fato pode estar relacionado com o aumento da densificação e conseqüente diminuição da frequência de espaços vazios muito pequenos na amostra com menor porosidade ($< 2 \mu\text{m}$).

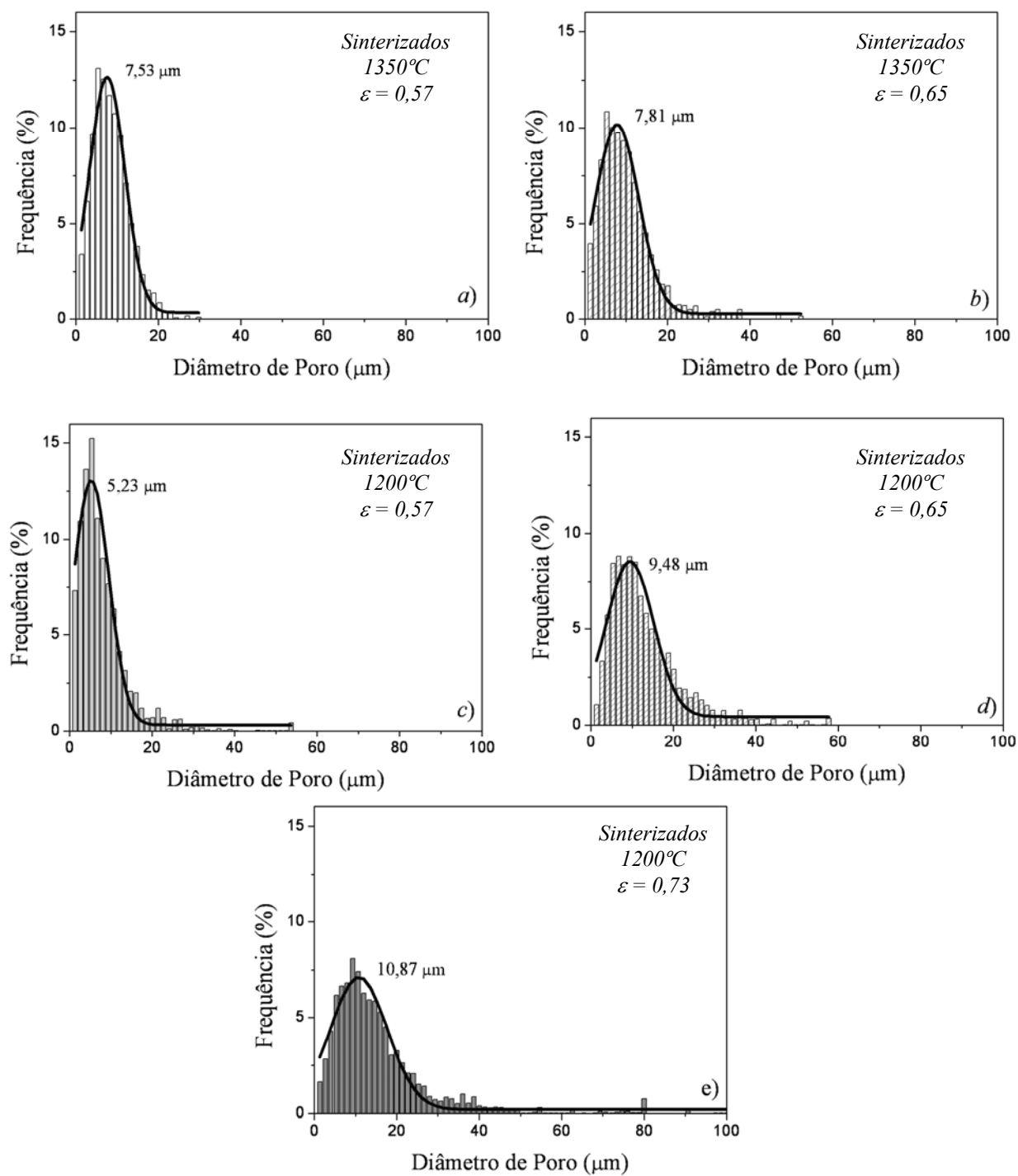


Figura 17: Distribuição de tamanho médio de poro dos filtros fibrosos.

4.3 ANÁLISE DE MICRTOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA

A Figura 18 mostra a reconstrução de imagens de dois filtros, com diferentes porosidades, obtidas por microtomografia computadorizada (μ -CT). Diferenças significativas nas superfícies das amostras podem ser notadas. O filtro com maior densidade relativa apresenta uma superfície mais densa.

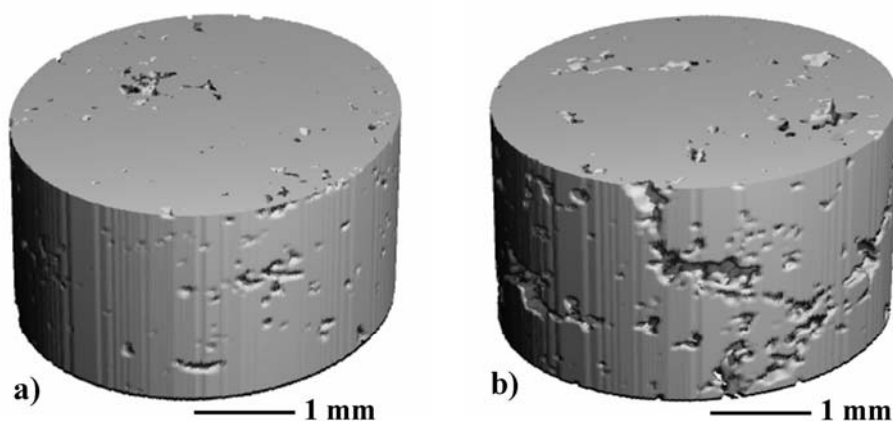


Figura 18: Reconstrução de imagens tomográficas de raios X de dois filtros com diferentes densidades relativas; a) 0,88 e b) 0,95.

Muito embora a reconstrução não represente as porosidades medidas através da Equação (12), pode-se estabelecer uma relação direta com os dados de μ -CT, através de correlações entre os parâmetros morfométricos apresentados na Tabela IV, juntamente com os respectivos valores de densidade relativa calculados através da Equação (12).

Tabela IV: Parâmetros morfométricos dos filtros cerâmicos fibrosos.

ρ_{rel} (Eq. 12)	ρ_{rel} (μ -CT)	SMI (1)	DA (1)	CD (1/mm ³)
0,44	0,94	-41,9	1,19	29,9
0,26	0,89	-19,2	1,21	10,1
0,32	0,88	-24,6	1,20	31,8
0,34	0,75	-7,4	1,09	104,7

As diferenças entre as porosidades são atribuídas à baixa resolução de análise do equipamento. Apenas os elementos sólidos separados por vazios maiores que a resolução de medida foram considerados para a reconstrução e no cálculo dos parâmetros estruturais. Filtros com maiores densidades relativas apresentam menor conectividade entre poros.

A Figura 19 mostra os valores de SMI em função da densidade relativa dos filtros cerâmicos. Valores de SMI negativos indicam superfícies sólidas côncavas que circundam os poros (ZESCHKY, 2005). Esse tipo de morfologia é característico de coalescência de poros. Neste caso um poro ou vazio pode ser bem representado como um espaço vazio, interconectado, cujas superfícies sólidas côncavas que os cercam correspondem às fibras. Desta forma, quanto menor (mais negativo) for o valor de SMI, pode se entender que mais fibras cercam um determinado poro até fechá-lo completamente, ou seja, maior será a densidade relativa, como apresentado na Figura 19.

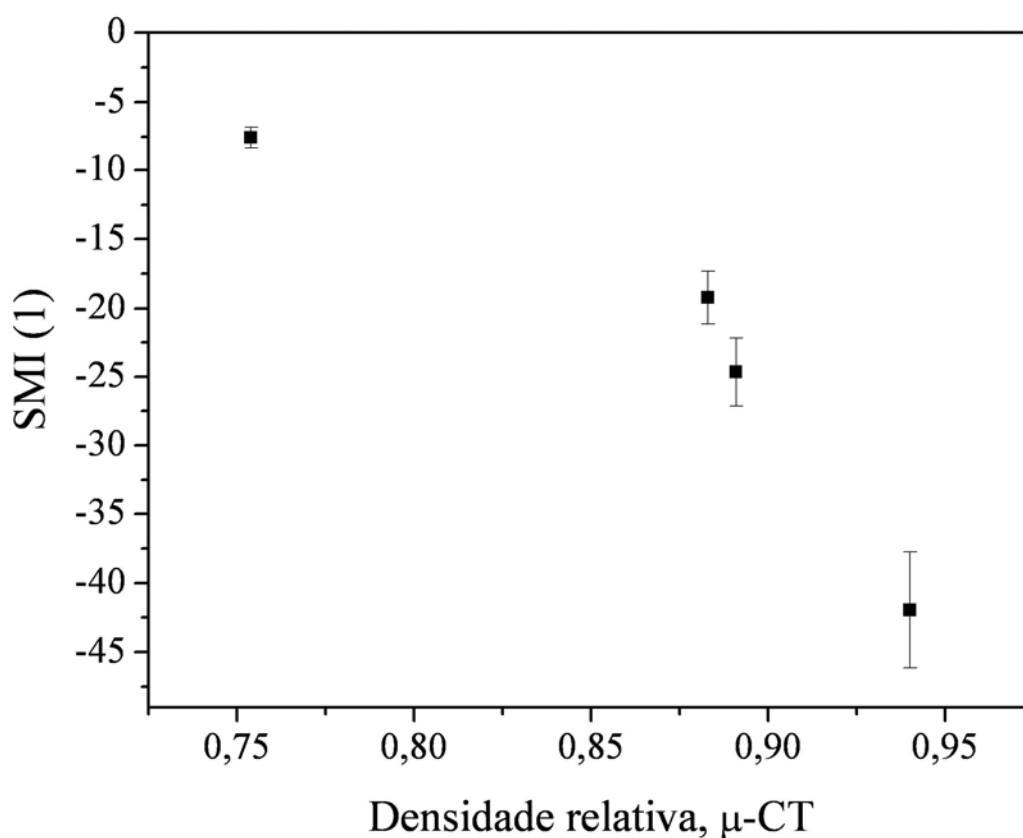


Figura 19: *Structure model index* (SMI) em função da densidade relativa derivada de μ -CT.

A Figura 20 mostra a relação entre o grau de anisotropia (DA) e a densidade de conectividade (CD) entre poros.

Quanto mais isotrópica for a distribuição das fibras no espaço, maior será o número de conexões entre um poro e seus vizinhos. Desta forma, quanto maior for a anisotropia, pode se entender que mais fibras cercam um determinado poro num determinado plano (no caso o plano x-y, de prensagem da amostra), ou seja, menor será o número de conexões entre esse poro e seus vizinhos.

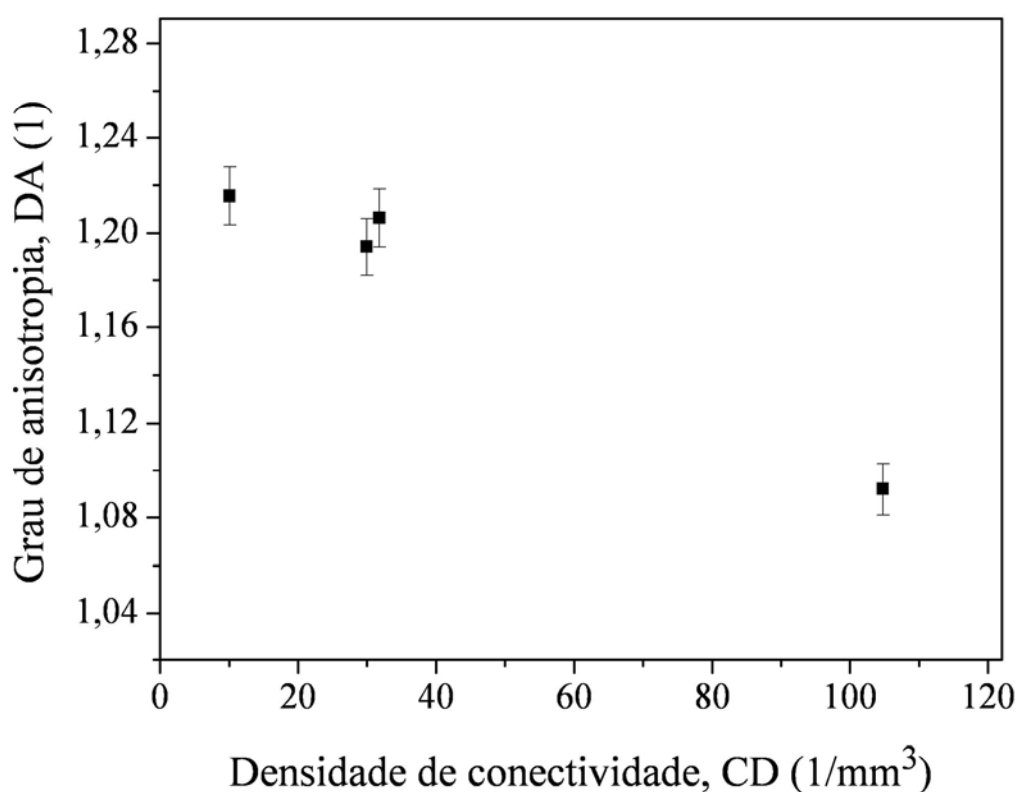


Figura 20: Grau de anisotropia (DA) *versus* densidade de conectividade (CD) entre poros.

4.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS

Foram realizados ensaios mecânicos de compressão e flexão em amostras com diferentes tratamentos térmicos (750, 1000, 1200 e 1350°C). Foi observado que as amostras sinterizadas com temperatura de 750°C e 1000°C apresentavam uma estrutura muito frágil sendo inviáveis para os ensaios. Visto que os filtros cerâmicos devem apresentar uma resistência adequada, somente foram avaliados ensaios mecânicos com amostras sinterizadas a 1200°C e 1350°C.

4.4.1 Ensaios de resistência à compressão de amostras sinterizadas.

As curvas típicas tensão – deformação para os filtros cerâmicos fibrosos sinterizados a 1200°C e 1350°C com diferentes porosidades para ensaios mecânicos sob compressão são mostradas na Figura 21.

De acordo com o modelo de Gibson e Ashby (GA), que descreve o comportamento mecânico das estruturas celulares, a falha dos materiais cerâmicos celulares, bem como em malhas de fibras cerâmicas ocorre por fratura frágil.

Na Figura 21a observa-se a presença dos três estágios principais na curva tensão-deformação de cerâmicas com estrutura celular, sob compressão: 1) regime linear elástico, correspondendo à flexão das fibras dos espaços vazios ou estiramento dos espaços vazios. Nesse estágio observa-se que a amostra com de 50% de porosidade, apresentou uma carga máxima de 86 N e a amostra com 65% de porosidade alcançou uma carga máxima de 27 N; 2) patamar de tensão, correspondendo à fratura progressiva das fibras e 3) densificação, correspondente à extinção dos espaços vazios por todo o material com simultânea compactação das fibras umas sobre as outras (GIBSON e ASHBY, 1997).

Pode ser observado novamente na Figura 21b os três regimes: 1) linear elástico, o qual observa-se que a amostra com 55% de porosidade suportou uma carga máxima 87N; 2) patamar de tensão e 3) densificação.

Observa-se que os gráficos apresentam o mesmo comportamento nas diferentes temperaturas de sinterização.

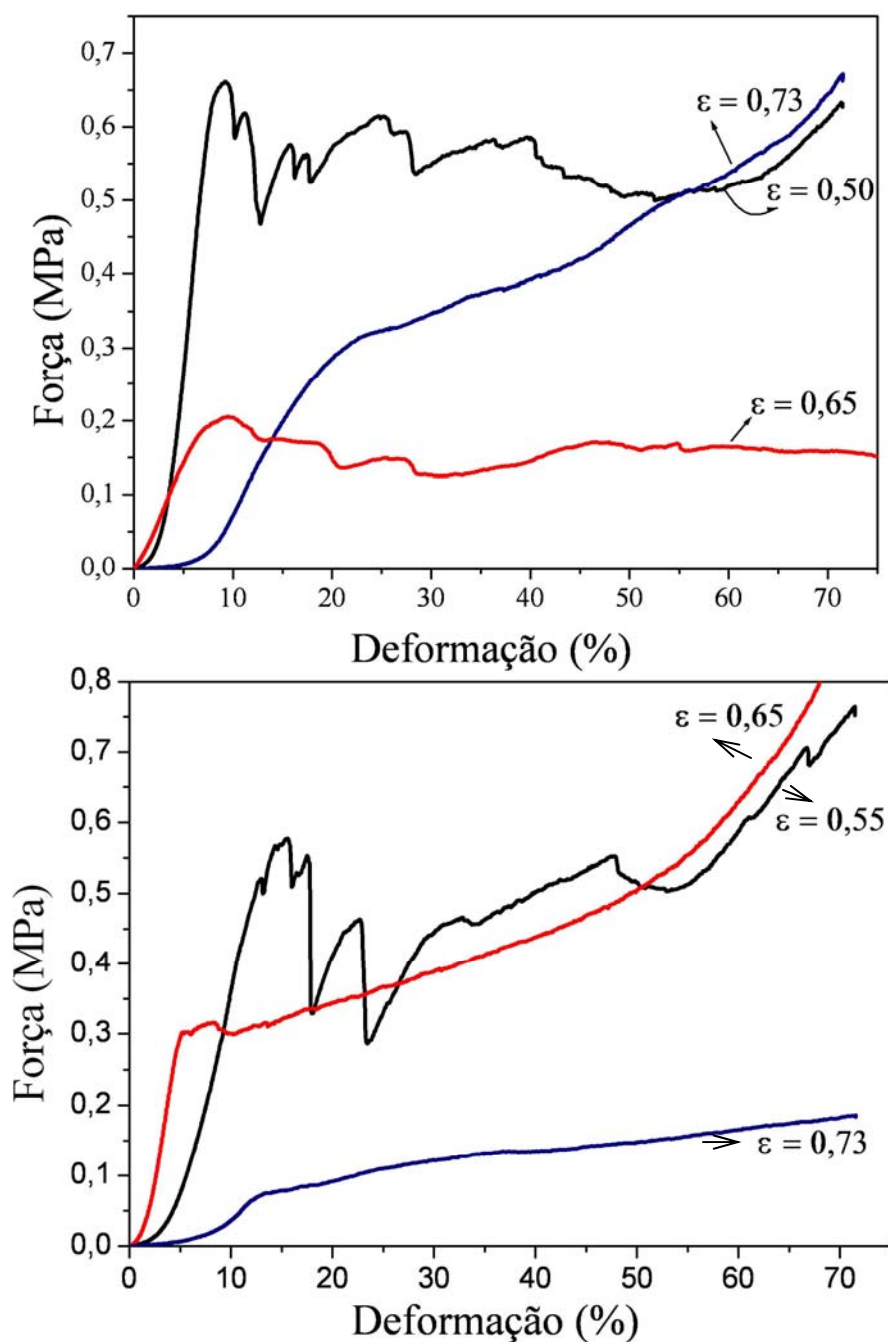


Figura 21: Curva de Tensão-Deformação sob compressão dos filtros cerâmicos fibrosos sinterizados: a) 1200°C e b) 1350 °C com diferentes porosidades.

A Figura 22 mostra a resistência máxima sob compressão em função da densidade relativa ($\rho_{rel} = \rho_o / \rho_s$) dos filtros cerâmicos fibrosos sinterizados a 1200°C (Figura 22a) e 1350 °C (Figura 22b). A resistência máxima variou entre 0,3 e 1,3 MPa para porosidades entre 73 e 57%,

respectivamente como observado na Figura 22a. A resistência à compressão aumenta com o aumento da densidade relativa, como esperado para materiais porosos (GIBSON e ASHBY, 1997).

Foi observado, ainda, que valores muito próximos de densidade relativa, apresentaram valores em uma ampla faixa de resistência, o que provavelmente está relacionado às variações locais na distribuição de tamanho das fibras, provenientes do processo de conformação. Isso acarretou desvios substanciais na média de resistência à compressão para uma mesma porosidade, como pode ser observado no gráfico.

Ajustando os dados experimentais pela Equação (14) e fixando o valor de n igual a 1,5 (modelo de Gibson-Ashby-curva sólida), um desvio maior pode ser observado para baixos valores de densidade relativa.

Um melhor ajuste foi conseguido quando os dados experimentais foram ajustados com a mesma equação, porém sem fixar o valor de n . Para a Figura 22a, foi encontrado para a estrutura fibrosa n igual a 2,2 (curva não pontilhada). Para $n = 1,5$ o valor C_1 é igual a 0,011 (coeficiente de correlação, $R^2=0,71$) e, para $n = 2,2$ o valor de C_1 é igual a 0,04 (coeficiente de correlação, $R^2=0,84$). Pode-se observar na Figura 22b o n encontrado para a estrutura fibrosa é igual a 3,1 (curva não pontilhada). Para $n = 1,5$ o valor C_1 é igual a 0,011 (coeficiente de correlação, $R^2=0,78$) e, para $n = 3,1$ o valor de C_1 é igual a 0,05 (coeficiente de correlação, $R^2=0,97$).

A diferença no valor de n entre os modelos pode ser explicada pelo fato do modelo de Gibson e Ashby basear-se no colapso catastrófico de células homogêneas sem defeitos em seus filamentos sólidos. Como o material é composto por uma rede de fibras heterogêneas, com ampla distribuição de diâmetros, desvios do modelo são naturalmente esperados. Ainda, o valor de n depende do modelo micro-mecânico utilizado para descrever a estrutura celular/fibrosa, dos defeitos microestruturais existentes nos filamentos sólidos e também do mecanismo de transferência de carga entre os constituintes do material (OLIVEIRA et al., 2006).

Adicionalmente, valores mais baixos de σ_0 podem ser atribuídos a uma desordem das células/poros (não-homogeneidade de tamanho e morfologia), gerando valores mais elevados de n .

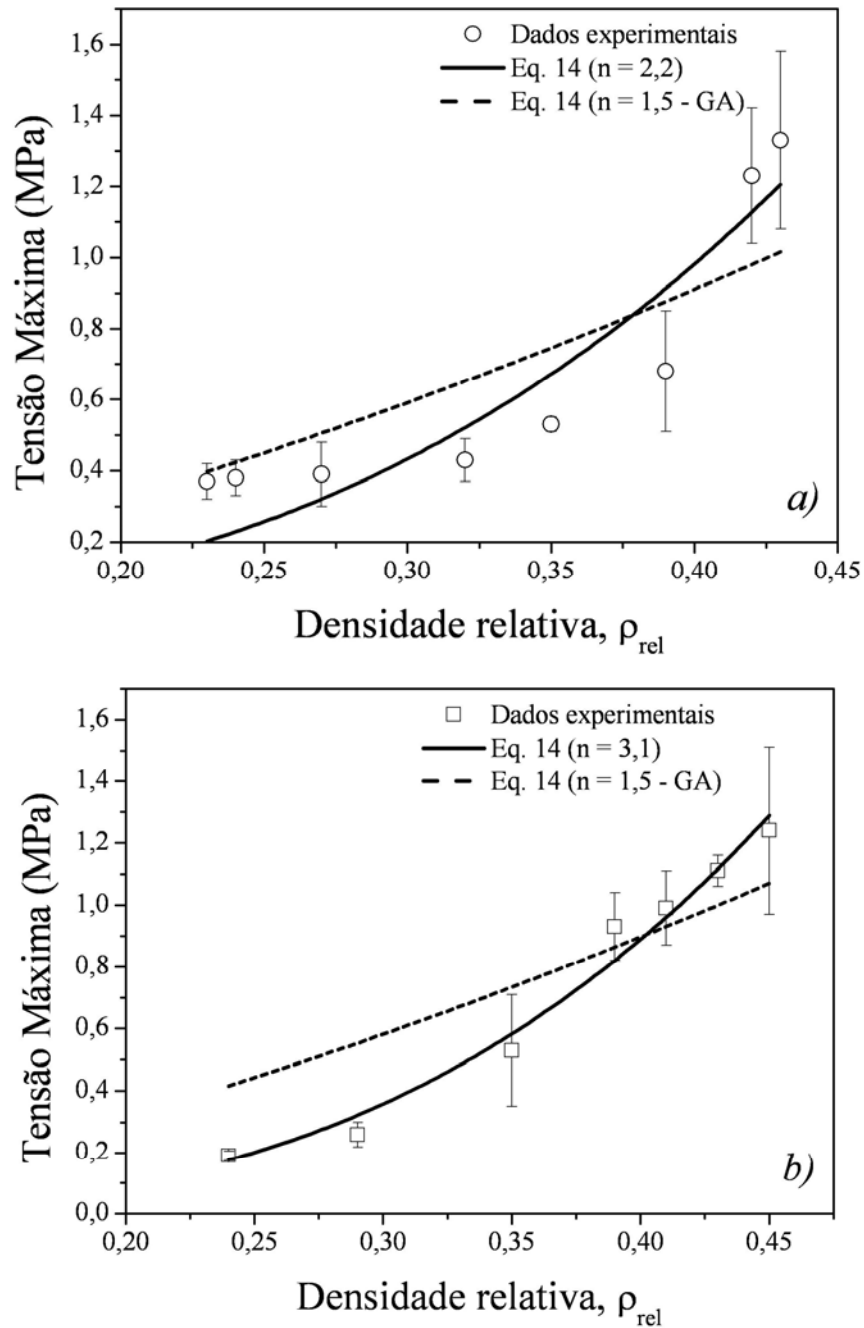


Figura 22: Resistência à compressão em função da densidade relativa dos filtros cerâmicos fibrosos sinterizados: a) 1200°C e b) 1350 °C.

4.4.2 Ensaios de resistência à flexão de amostras sinterizadas.

As curvas típicas tensão – deformação para os filtros cerâmicos fibrosos sinterizados a 1200°C com porosidades de 70% obtidas de ensaios mecânicos sob flexão à temperatura ambiente e a 800°C são mostradas na Figura 23.

Analogamente aos ensaios de resistência à compressão, pode-se observar nas duas amostras a presença de pelo menos dois dos três estágios na curva tensão-deformação de cerâmicas fibrosas; 1) regime linear elástico, em que foi determinada uma resistência máxima de 0,11 MPa, a uma deformação de 1,7% na amostra testada em temperatura ambiente (Figura 23a); e de 0,17 MPa à 1,2% para a amostra testada a 800°C (Figura 23b). Esse regime está relacionado ao envergamento elástico das fibras; 2) Patamar de tensão, que corresponde ao colapso progressivo das fibras; e 3) Densificação, correspondente ao intervalo de deformação de apenas 0,5% (somente presente na Figura 23a), seguido pela ruptura por flexão da amostra.

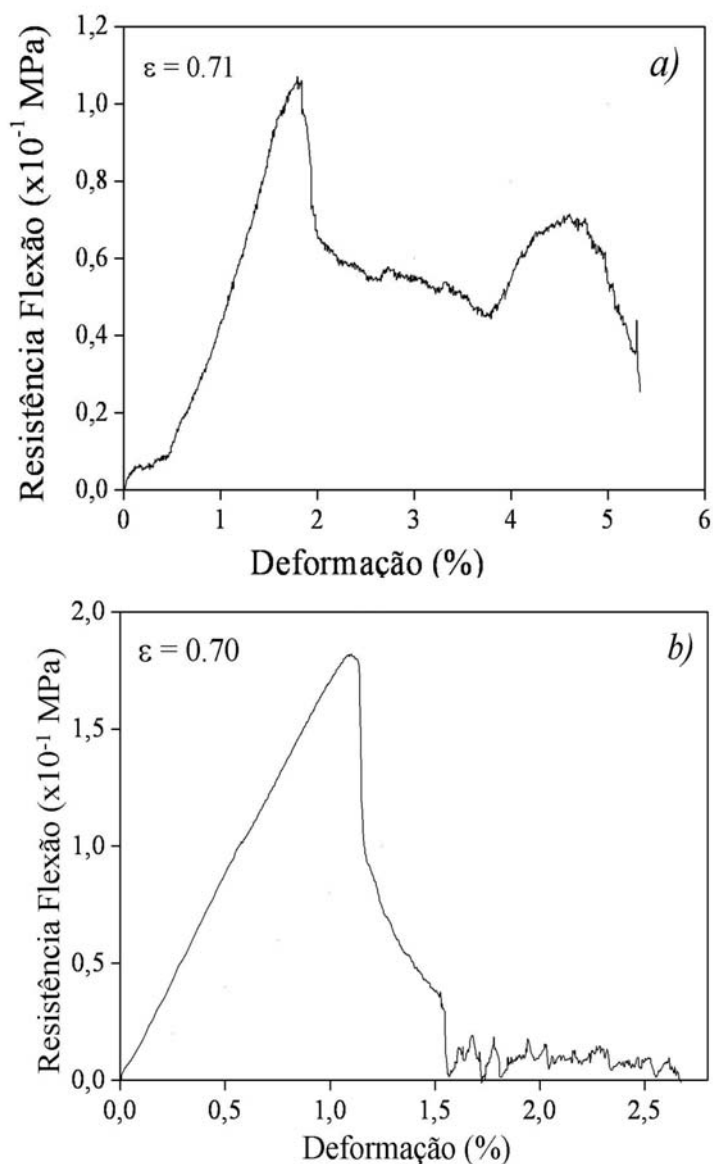


Figura 23: Curva de Resistência-Deformação dos filtros cerâmicos fibrosos, sob tensão de flexão, sinterizados a 1200°C: a) temperatura ambiente e b) 800°C.

A Figura 24 apresenta a resistência à flexão dos filtros fibrosos sinterizados a 1200°C e 1350°C em função da densidade relativa obtidas a diferentes temperaturas (25°C, 800°C e 1000°C). Pode-se observar que, para as três temperaturas, a resistência à flexão aumentou com o

aumento da densidade relativa, apresentando valores que variaram de 0,2 a 0,7 MPa nas temperaturas analisadas como mostrado na Figura 24a.

Para a Figura 24b, pode-se observar que para as duas temperaturas, a resistência à flexão aumenta com o aumento da densidade relativa, apresentando valores que variaram de 0,2 – 0,6 MPa nas temperaturas analisadas.

Os ensaios de resistência à flexão em diferentes temperaturas, tanto para os filtros sinterizados a 1200°C, quanto para os filtros sinterizados a 1350°C, mostraram que os filtros fibrosos apresentaram um comportamento adequado, pois suas resistências não foram afetadas substancialmente com o aumento da temperatura isto é, não houve comprometimento da microestrutura do filtro, mantendo-se os valores próximos aos da temperatura ambiente o que justifica a utilização dos filtros em aplicações a temperaturas elevadas.

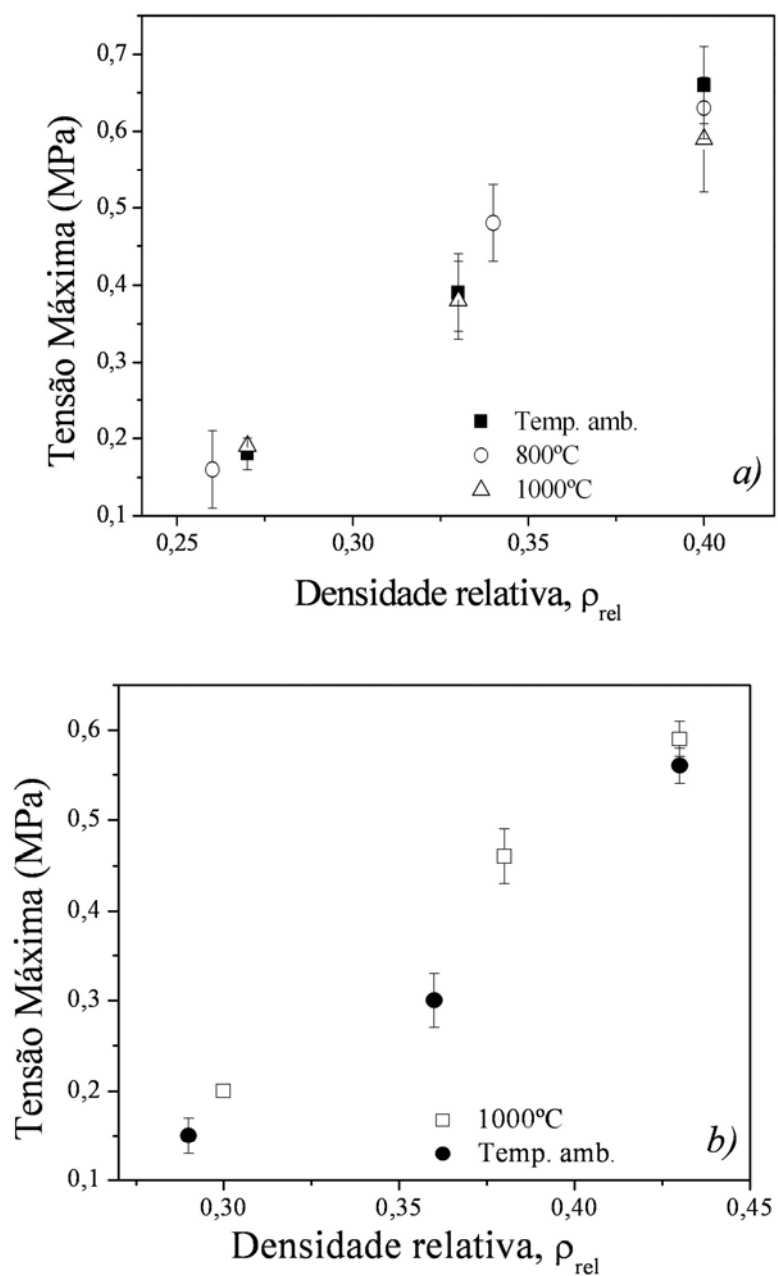


Figura 24: Resistência à flexão dos filtros fibrosos a diferentes temperaturas: a) temperatura ambiente, 800°C e 1000°C sinterizados a 1200°C e b) temperatura ambiente e 1000°C em sinterizados a 1350°C.

4.5 PERMEABILIDADE

Os ensaios de permeabilidade nos filtros fibrosos foram realizados ensaios em triplicatas variando-se a velocidade superficial para diferentes temperaturas na faixa de 14 a 700°C. Para cada valor de velocidade, determinou-se o valor da queda de pressão correspondente. A partir dos dados foram construídos gráficos da queda de pressão em função da velocidade superficial. A velocidade do ar foi corrigida para a temperatura de cada ensaio conforme a Equação (5). Do mesmo modo, a viscosidade e a densidade do ar também foram corrigidas.

A Figura 25 mostra o comportamento da queda de pressão em função da velocidade para os filtros de temperatura de sinterização de 750°C e 1000°C com porosidade de 68% e 58% respectivamente.

Observa-se que ocorreu um aumento não linear na queda de pressão quando do aumento da velocidade. Nestas figuras também pode ser observada a influência da temperatura sobre a queda de pressão. Verificou-se que para uma mesma faixa de velocidade, houve a diminuição da queda de pressão com a elevação da temperatura.

O aumento da temperatura também aumentou a extensão da curva. A temperatura e a perda de carga influenciam as propriedades do ar (viscosidade e densidade), podendo alterar a contribuição do termo inercial e viscoso da equação de Forchheimer (2). Pode-se observar que a tendência da queda de pressão é de diminuir com o aumento da temperatura. Apenas para a temperatura de 700 °C não houve a mesma tendência. Esse comportamento pode ser explicado levando-se em conta as alterações ocorridas nas propriedades do ar, ocasionando alterações nas contribuições dos termos viscosos e inerciais.

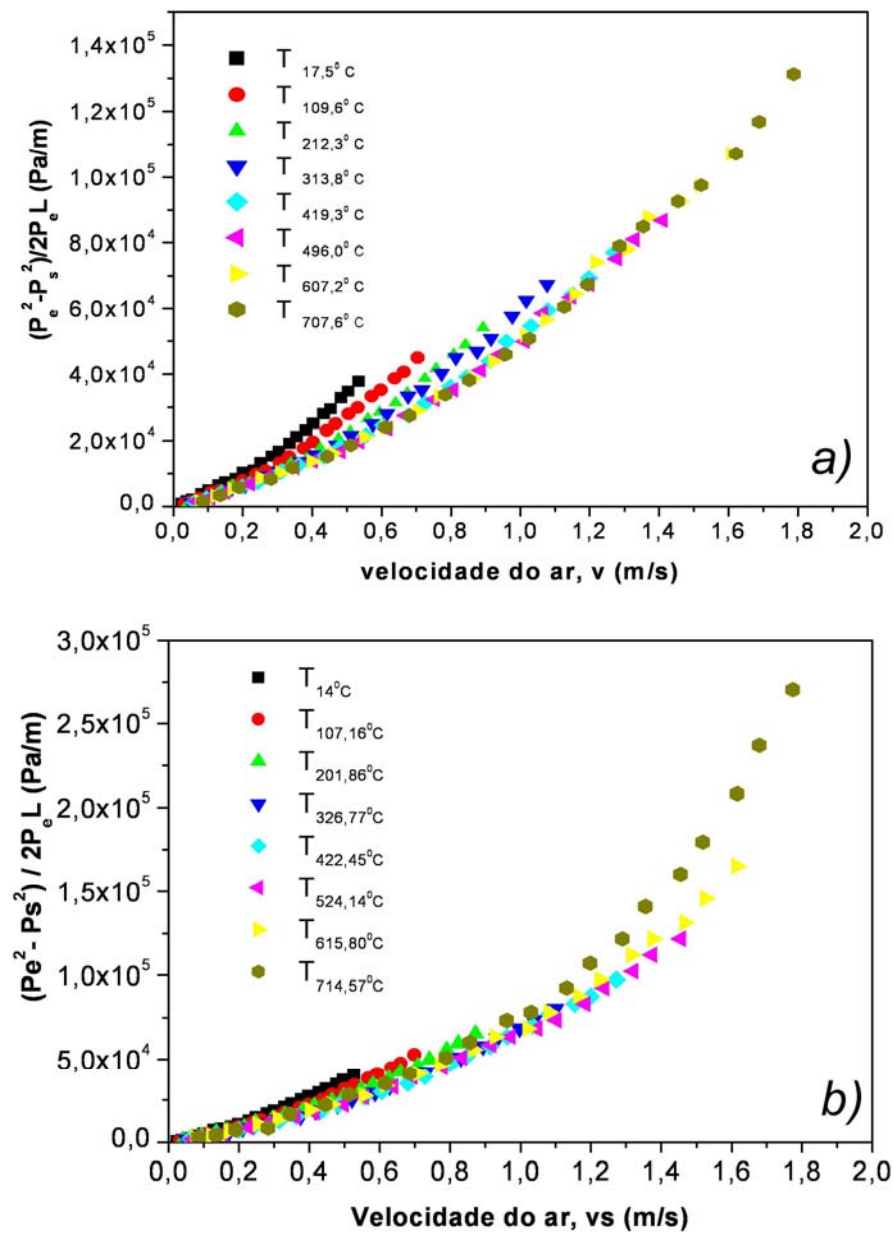


Figura 25: Curvas de queda de pressão em função da velocidade em várias temperaturas para os filtros fibrosos: a) sinterizado a 750°C com porosidade de 68% e b) sinterizado a 1000°C com porosidade de 58%.

A Figura 26 mostra o comportamento da queda de pressão em função da velocidade para os filtros de temperatura de sinterização de 1200°C com diferentes porosidades: 50%, 65% e 73% respectivamente.

A resistência ao escoamento das amostras modifica-se significativamente com o aumento da temperatura para todos os filtros testados e exibe uma tendência parabólica. Observa-se que quanto mais porosa, mais permeável será a amostra (o k_2 aumenta mais rapidamente que o k_1) e assim maior será a influência do termo quadrático. A intensidade do termo quadrático aumenta para velocidades superiores a 0,2 m/s, indicando que o termo inercial não é irrelevante em análises de permeabilidade. A queda de pressão é alta para amostras com baixa porosidade. Para altas porosidades, contudo os efeitos inerciais tornam-se muito evidentes (Figura 26a e 26b). A queda de pressão para todas as amostras diminui para uma determinada velocidade do ar acima de 400°C. Acima desta temperatura a curva de pressão exibe um comportamento inverso. Esse comportamento pode estar relacionado com a morfologia e tamanho de poros presente na amostra, os quais exercem influência na passagem do ar. Outra explicação para esse comportamento leva em conta as alterações ocorridas nas propriedades do ar que são afetadas por temperatura e pressão como mostrado nas equações 5 e 6 e estes parâmetros podem alterar a contribuição do termo inercial e viscoso. O aumento da temperatura também causa uma expansão da curva de pressão, desde que o escoamento volumétrico aumenta com o aumento da temperatura embora o fluxo de massa permaneça constante.

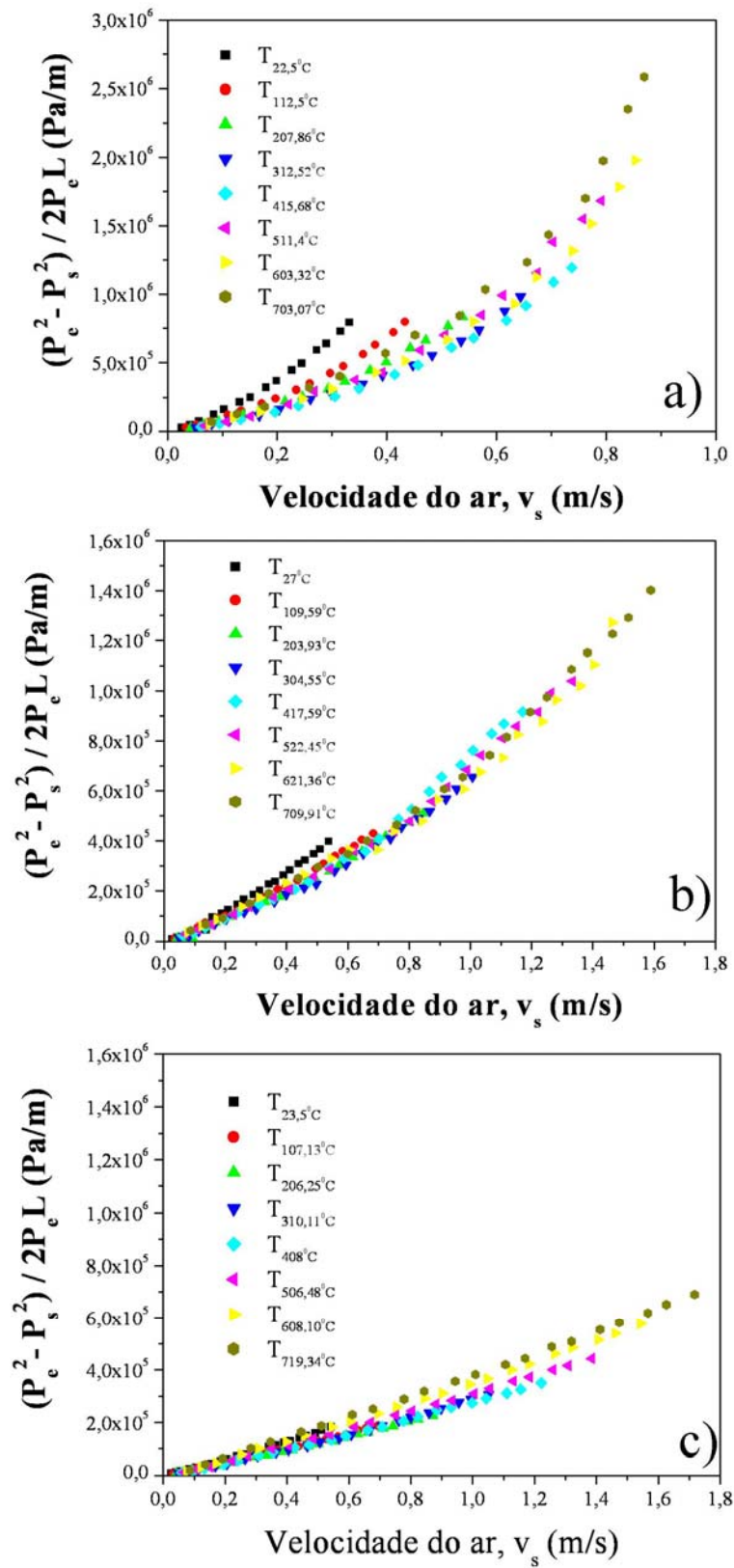


Figura 26: Curva da queda de pressão em função da velocidade em várias temperaturas para filtros fibrosos com diferentes porosidades: a) 50%, b) 65% e c) 73% sinterizado a 1200°C.

A Figura 27 apresenta o comportamento das constantes de permeabilidade Darciana e Não-Darciana, k_1 e k_2 , em função da temperatura do ar, para os filtros estudados. As constantes de permeabilidade k_1 e k_2 foram obtidas através do ajuste dos dados experimentais apresentados na Figura 27, utilizando-se a Equação de Forchheimer (2) e utilizando as correções nas propriedades do ar corrigidas em função da temperatura mostradas nas eqs (5) e (6). Os ensaios de permeabilidade em temperaturas elevadas mostraram a complexidade das interações entre as propriedades do gás e da estrutura fibrosa.

Constatou-se que a constante de permeabilidade Darciana (k_1) aumenta com o aumento da temperatura e a constante Não-Darciana (k_2) diminui com o aumento da temperatura para todos os filtros estudados. A temperatura pode causar modificações nas propriedades do fluido bem como na estrutura porosa, resultando em alterações nas constantes de permeabilidade k_1 e k_2 . Tais mudanças podem ocorrer na porosidade (ϵ), no diâmetro de fibra (d_f), comprimento espessura do leito (L), etc. Esses efeitos dependem da contração ou da dilatação dos poros da estrutura fibrosa com o aumento da temperatura. É importante notar que os valores obtidos para a permeabilidade darciana, k_1 , estão na ordem de grandeza esperada para filtros de gases (SEVILLE, 1987 e FREITAS et al., 2006) justificando a condução de estudos para sua utilização industrial.

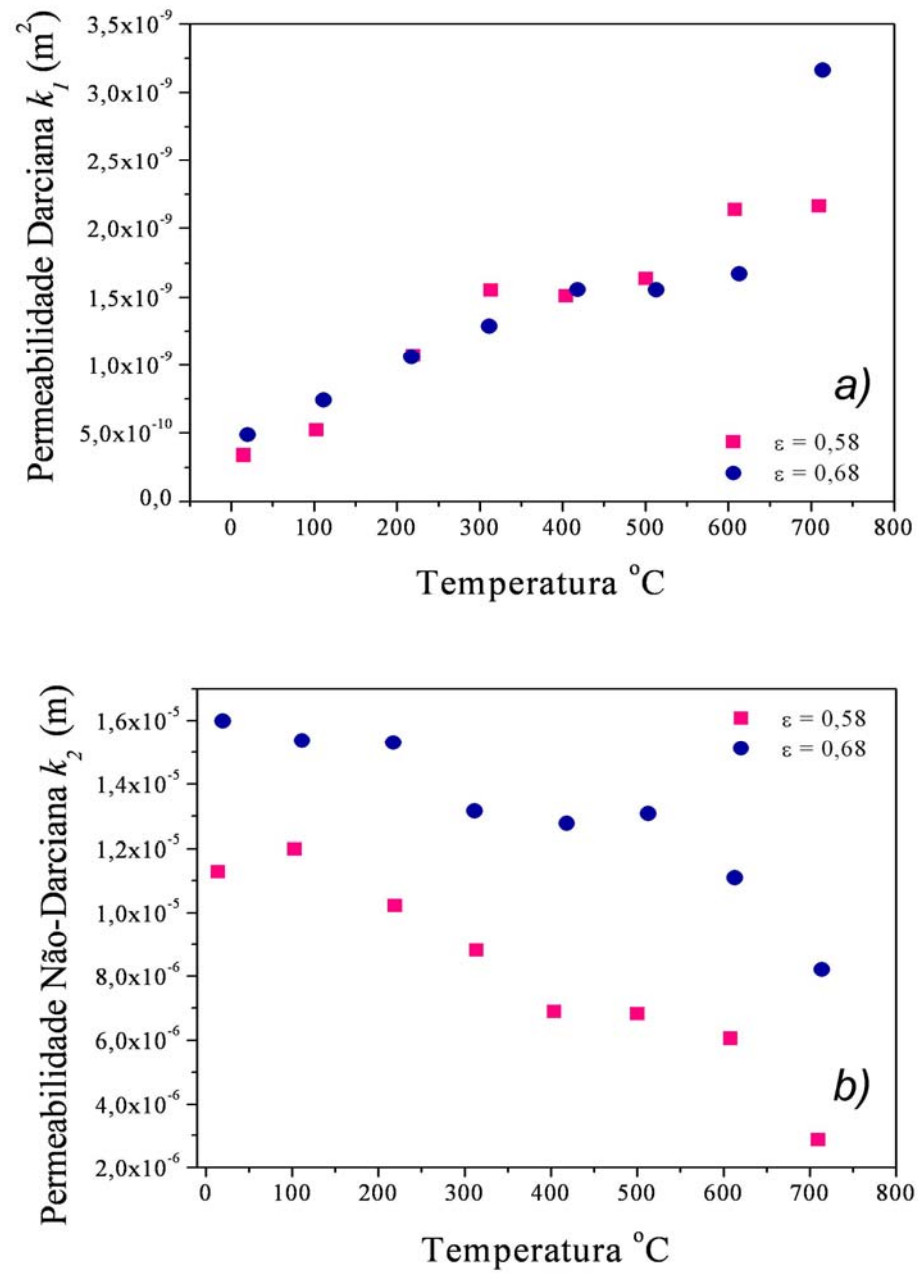


Figura 27: Permeabilidades: a) darciana (k_1) e b) não-darciana (k_2) em função da temperatura para os filtros fibrosos sinterizados a 750°C ($\epsilon=0,68$) e 1000°C($\epsilon=0,58$).

A Figura 28 apresenta os resultados das constantes de permeabilidades Darciana (k_1) e Não-Darciana (k_2) em função da temperatura para os filtros fibrosos sinterizados a 1200°C com

diferentes porosidades 50, 65 e 73%.

A permeabilidade Darciana k_1 tende a aumentar com o aumento da temperatura para todas as amostras. Este efeito é muito evidente para amostras com 50,0% de porosidade acima de 400°C.

A dependência da permeabilidade com a porosidade total é naturalmente esperada e sustenta observações sobre o aumento de k_1 com a porosidade, para uma determinada temperatura acima de 400°C. Acima desta temperatura mudanças estruturais podem ser responsáveis pelo comportamento inverso. Mudanças no número de poros e na área de escoamento contribuem para estas mudanças como discutidas anteriormente, modificando a relação entre os dois regimes de escoamento.

A permeabilidade depende não somente da porosidade total, mas também do tamanho, geometria de poros e número de poros na área de escoamento da estrutura. Os filtros cerâmicos fibrosos exibem alta permeabilidade considerando a anisotropia dos vazios formados por redes de fibras e comparadas com os filtros $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiC}$ para uma mesma porosidade (Innocentini, et al., 1998).

A permeabilidade não-Darciana k_2 , por outro lado, diminui com a temperatura para amostra de 65% e permanece constante para filtros com 50% de porosidade. Os valores de k_2 para o filtro com porosidade de 73% apresentam-se dispersos, porém com valores significativamente mais altos, refletindo a sensibilidade dos efeitos inerciais para poros maiores. A superfície de vazios (poros apenas na superfície) do filtro de 73% de porosidade é inferior dos filtros de 50% e 65% de porosidade, o que indica uma distribuição de poros maiores sobre a superfície do filtro.

Os valores de permeabilidade dos filtros fibrosos em ordem de magnitude similar ao de suportes celulares para filtros de gases e aerossóis (FREITAS, et al., 2006 e MOREIRA e COURY, 2004) e, portanto para filtração de gases e aerossóis.

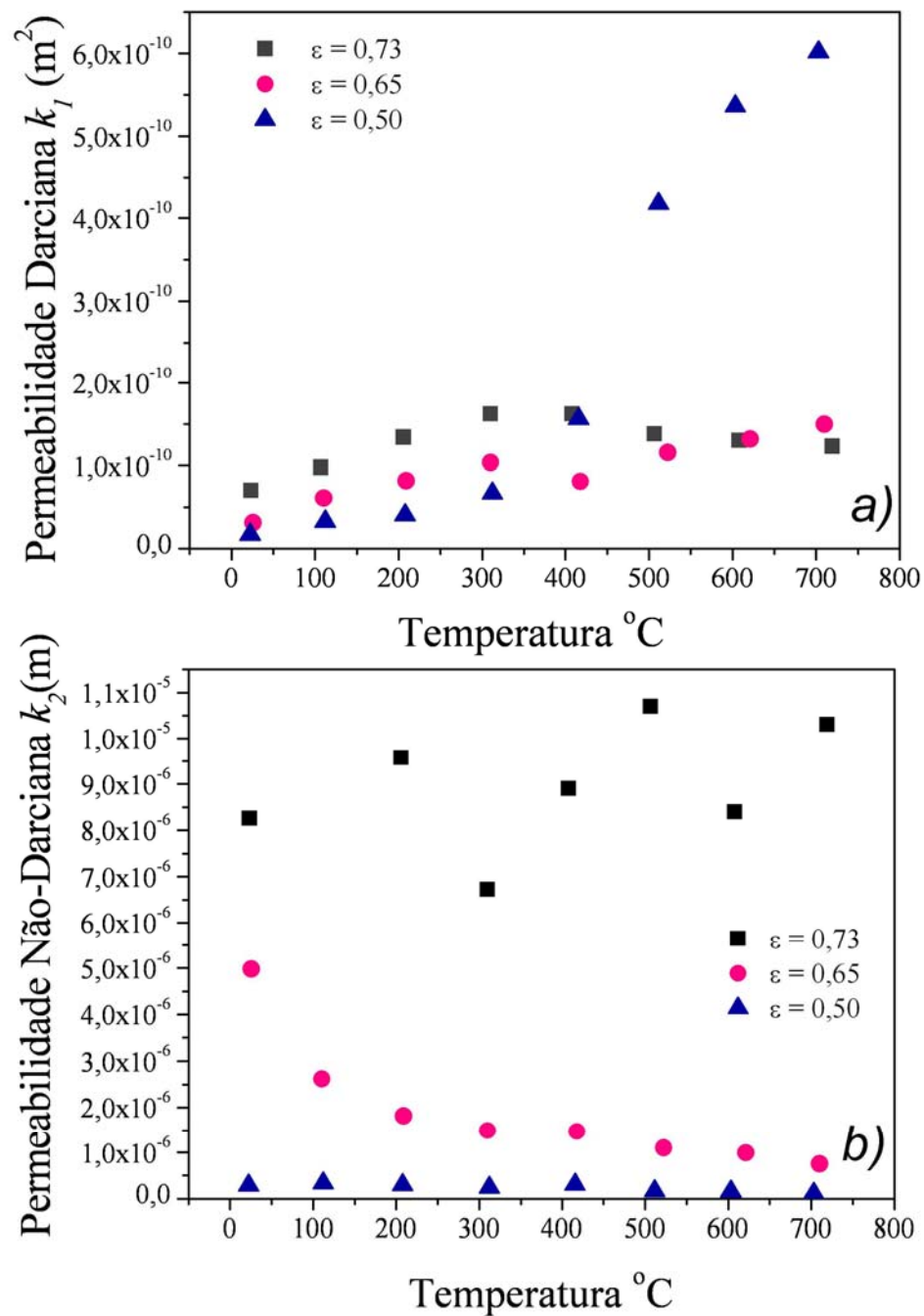


Figura 28: Permeabilidades: a) darciana (k_1) e b) não-darciana (k_2) em função da temperatura para os filtros fibrosos sinterizados a 1200 $^{\circ}C$ com diferentes porosidades.

A Figura 29 mostra o gráfico de permeabilidade para vários materiais porosos com evidência aos valores de permeabilidade para os filtros fibrosos desenvolvidos neste trabalho.

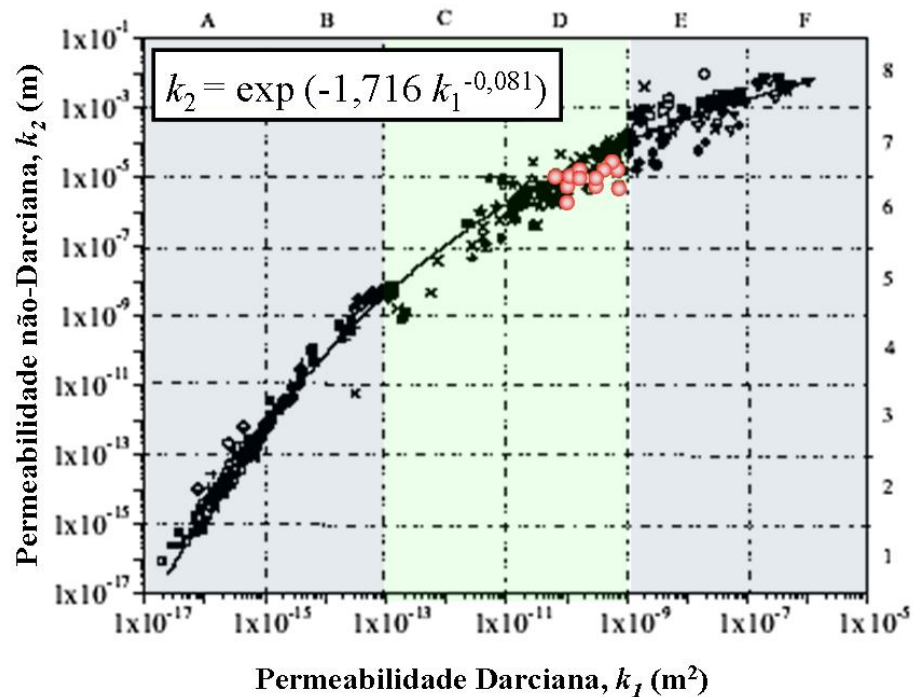


Figura 29: Dados de k_1 e k_2 na literatura. Os dados para filtros cerâmicos fibrosos deste trabalho estão evidenciados como círculos (adaptado de Innocentini em: SCHEFFLER e COLOMBO, 2005).

4.6 FILTRAÇÃO

A eficiência de coleta fracionária é a eficiência de coleta para cada faixa de diâmetro de partícula do material particulado, a qual é obtida através da análise de distribuição de tamanho de partícula. A eficiência de coleta experimental, por faixa granulométrica (E_i) foi determinada pela Equação 17.

A Figura 30 apresenta os resultados de eficiência de coleta em função do diâmetro do

material particulado nas três temperaturas de filtração para os filtros cerâmicos fibrosos sinterizados a 1200°C com diferentes porosidades.

Os ensaios de filtração em temperaturas elevadas mostraram as mesmas tendências observadas à temperatura ambiente. A observação mais significativa é que a eficiência do filtro diminui com o aumento da temperatura do gás nos ensaios realizados.

As razões para tal comportamento são diversas. O aumento de temperatura provoca alterações nas propriedades do gás (diminuição da densidade e aumento da viscosidade), que alteram a capacidade de remoção do filtro. Por outro lado, o aumento da temperatura causa também uma mudança estrutural no meio poroso devido a uma expansão térmica que embora em pequena magnitude, pode ter efeitos consideráveis na capacidade de remoção do filtro (FREITAS *et al.*, 2006 e INNOCENTINI, 1997).

Por outro ponto de vista, a operação de filtração a altas temperaturas também são fortemente influenciadas pelas propriedades adesivas e coesivas das partículas e o meio filtrante. Essas propriedades são determinadas pelas forças entre as partículas e as interações entre as partículas e o meio sólido. Em geral, essas forças sofrem um aumento com a elevação da temperatura aliando diferentes mecanismos. Temperaturas elevadas provocam um amolecimento das partículas, com conseqüente achatamento dos pontos de contato (PILZ, 1996).

Foi verificado que a eficiência de coleta fracionária aumentou com o diâmetro da partícula sendo que todos os filtros testados foram eficientes para a coleta de partículas acima de 4 µm. Partículas maiores apresentam uma maior inércia. É interessante frisar que, embora uma diminuição na eficiência aconteça com o aumento da temperatura, os níveis de remoção permanecem altos, e não comprometem o desempenho do filtro.

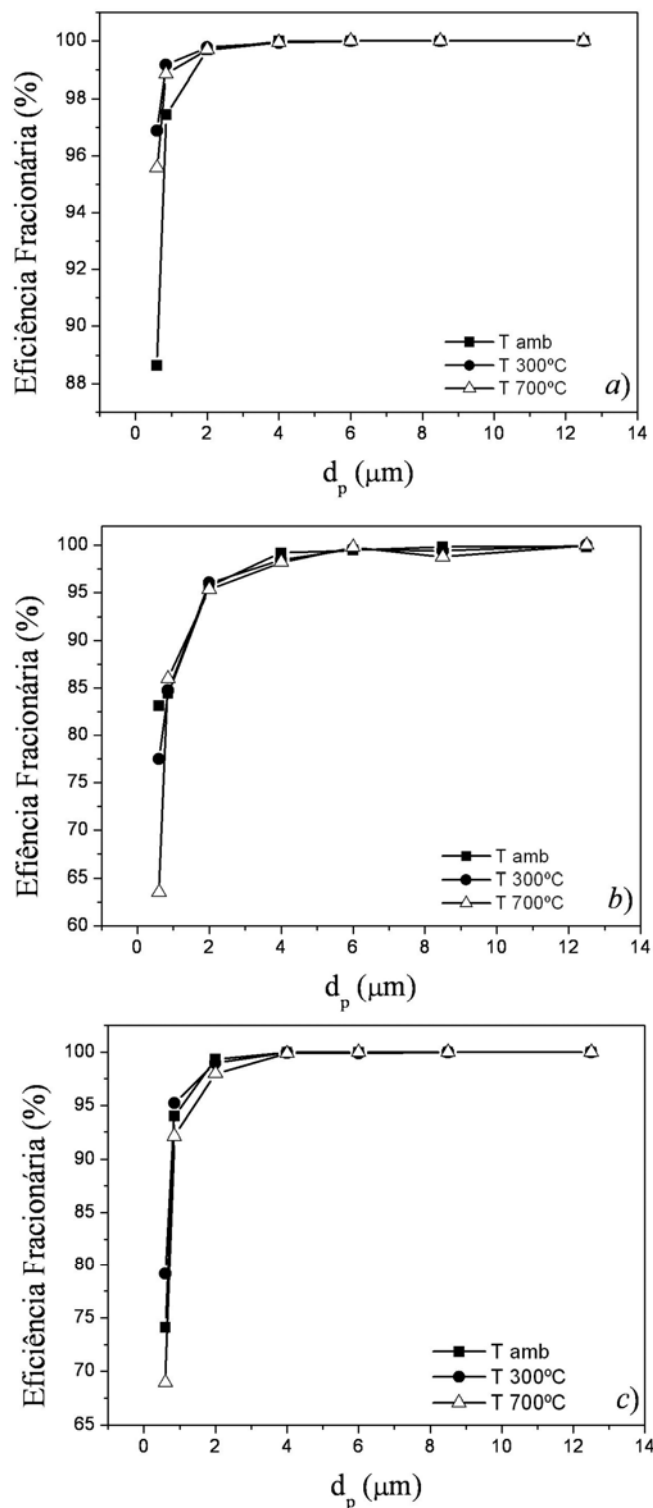


Figura 30: Eficiência de coleta fracionária em função do diâmetro de partícula do material particulado em diferentes porosidades: a) 73%, b) 65% e c) 50% em 20 minutos de filtração para os filtros cerâmicos fibrosos sinterizados a 1200°C.

A Figura 31 apresenta a comparação dos filtros cerâmicos fibrosos de diferentes porosidades sinterizados a 1200°C nas temperaturas ambiente, 300 e 700°C. Observa-se que o filtro que apresentou uma melhor eficiência de coleta foi o filtro com 73% de porosidade.

As complexas e dinâmicas interações que ocorrem entre as partículas e a superfície do filtro, no entanto, tornam o comportamento do filtro cerâmico extremamente dependente das condições de operação e do tipo de aerossol envolvido (FREITAS *et al.*, 2004).

Pode-se observar que a eficiência do filtro diminui com o aumento da temperatura do gás, principalmente para o filtro com porosidade de 73%. Parte deste efeito pode ser explicado pela variação das propriedades físicas do gás com a temperatura. Entretanto, mudanças estruturais nos filtros (como expansão térmica) podem desempenhar um papel importante neste comportamento.

Observa-se que a eficiência aumenta com o aumento do diâmetro de partícula. Pode-se observar que a eficiência de coleta foi crescente até o diâmetro de partícula de 4,0 μm , para o filtro com porosidade de 65% e 2,0 μm para os demais filtros, mostrando a predominância do mecanismo de coleta inercial. Entretanto, para diâmetros de partícula maiores que 4,0 μm observa-se um decréscimo na eficiência de coleta para o filtro com 65% de porosidade nas três temperaturas analisadas. Este comportamento, no entanto, não foi observado nos demais filtros. Pode-se observar também um aumento na eficiência de coleta ao longo do tempo de filtração. Este comportamento é característico de filtros tipo barreira, pois após a retenção, as partículas coletadas contribuem para captura de novas partículas (FREITAS *et al.*, 2006).

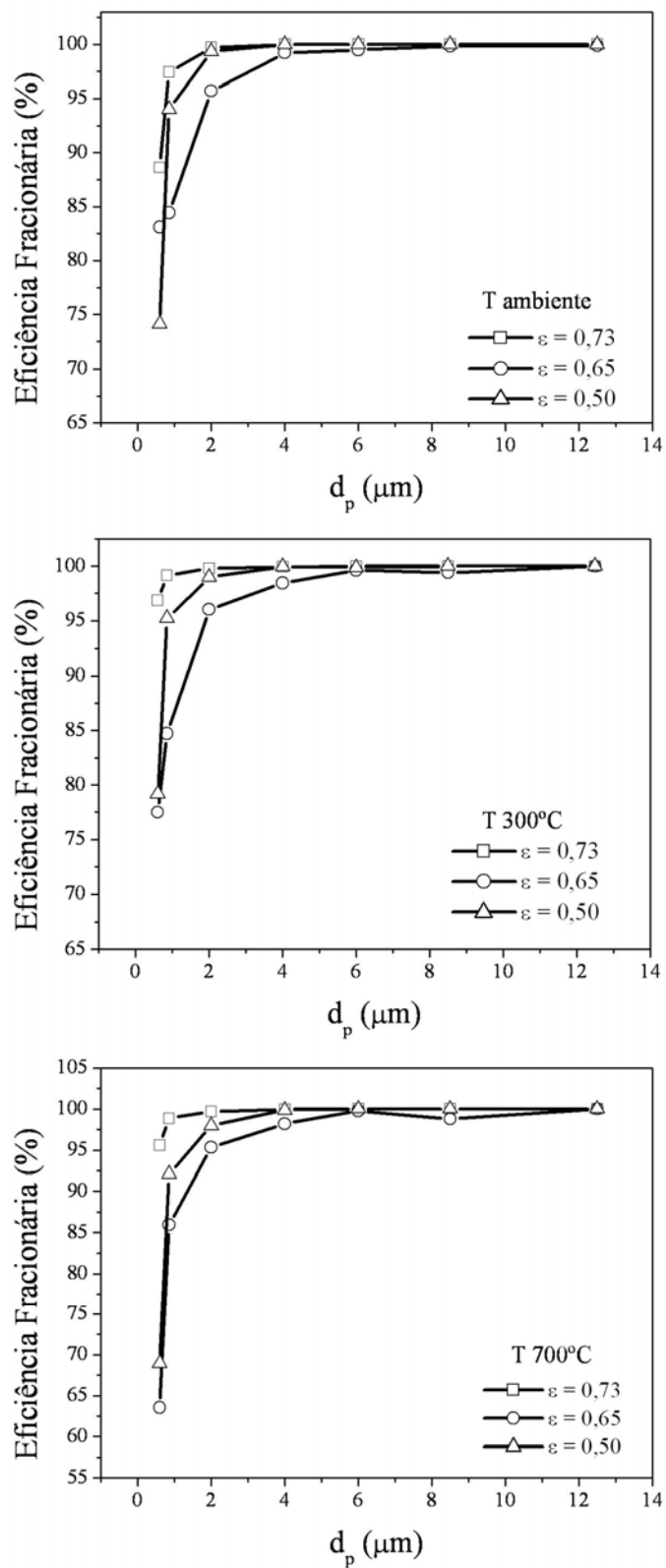


Figura 31: Eficiência de coleta fracionária para os três filtros cerâmicos fibrosos sinterizados a 1200°C operando a diferentes temperaturas: a) 25 °C; b) 300°C e c) 700°C.

A eficiência foi relativamente baixa em todas as temperaturas e filtros testados: entre 84-99% para o filtro com 65% de porosidade a temperatura ambiente. Uma comparação entre as eficiências nas 3 temperaturas avaliadas mostra que o filtro com 73% de porosidade apresentou melhor desempenho nas três temperaturas de filtração (eficiência entre 97,4 e 100% à temperatura ambiente; entre 99,1 e 100% a 300°C e entre 98,8 e 100% a 700°C). Esta eficiência pode estar provavelmente relacionada com a porosidade superficial que apresentou um valor menor, (15,7%) comparado aos outros filtros testados.

A Figura 32 apresenta a eficiência global dos filtros fibrosos em diferentes tempos de filtração. Pode-se observar que o filtro com porosidade de 73% apresenta maior eficiência global nas três temperaturas estudadas. Esta maior eficiência está relacionada com a porosidade superficial do filtro. O filtro com 73% de porosidade apresenta porosidade superficial de 15,7%, impedindo a passagem das partículas através do filtro. O filtro com 66% de porosidade foi o filtro que apresentou maior porosidade superficial de 24,6% resultando numa menor eficiência de filtração como mostrado na Figura 32. Este comportamento pode explicado ser através da expansão linear térmica como descrito anteriormente.

Pode-se observar que em todos os filtros, a filtração na temperatura ambiente apresentou melhor eficiência. Este fato está relacionado com o aumento da temperatura, no qual influencia nas propriedades do gás (como densidade e viscosidade) como mencionado anteriormente.

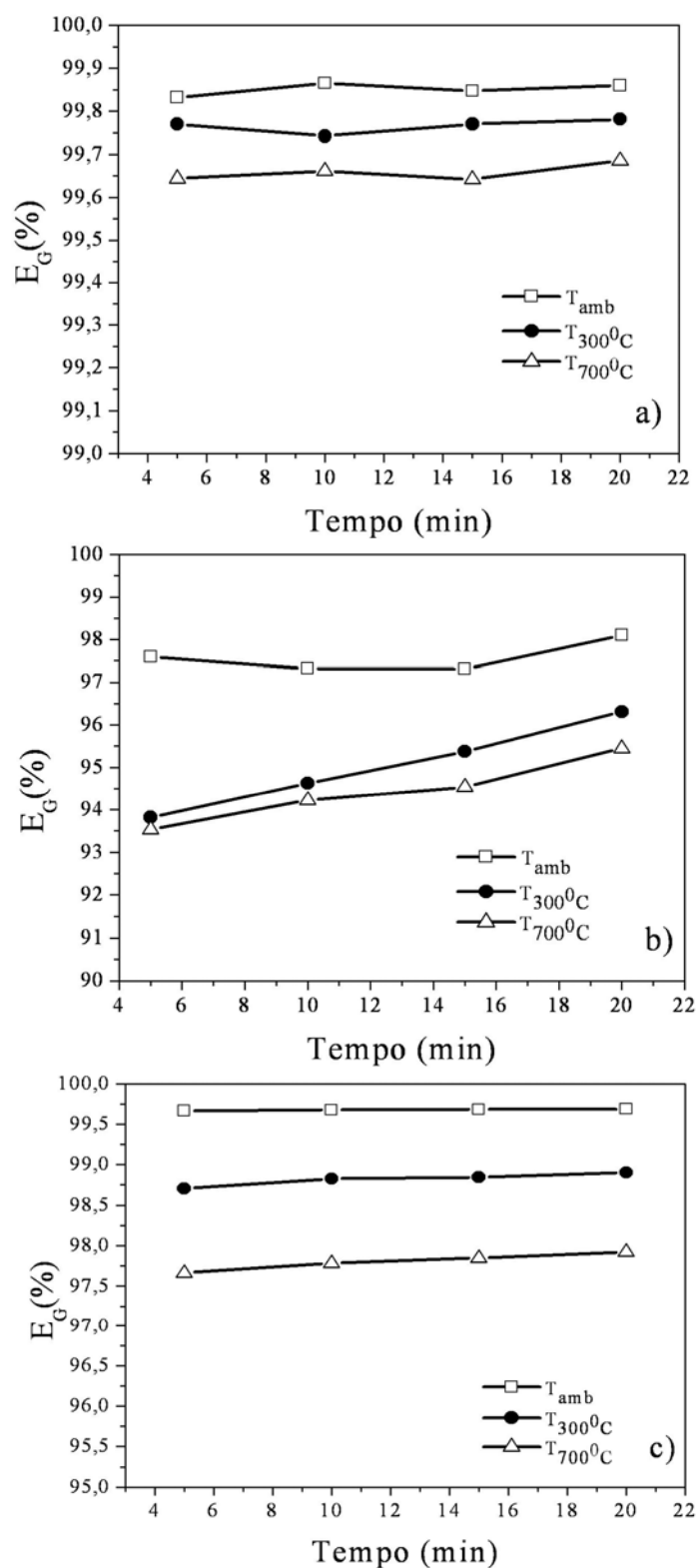


Figura 32: Eficiência global de filtração em função do tempo nas porosidades: a) 73%, b) 65% e c) 50% para os filtros cerâmicos fibrosos sinterizados a 1200°C.

Os mecanismos que melhor representam o comportamento de filtração de partículas faixa de 2 a 14 μm são o mecanismo inercial e o de interceptação direta. O primeiro resulta da inércia da partícula que está sendo carregada pela corrente gasosa. As linhas de fluxo do gás se curvam ao passar em torno do coletor e a capacidade da partícula acompanhar estas linhas decresce com o aumento de sua massa, devido à inércia. Já o mecanismo de interceptação direta que resulta do tamanho relativo entre a partícula e o coletor no filtro (STEFFENS, 2007).

Para efeitos ambientais, o mais importante não é a eficiência de coleta em si do filtro, mas sim a concentração de partículas na saída. Esse parâmetro é chamado de limite de emissão de particulados na atmosfera. A resolução CONAMA 382 de 2006 relata que a concentração máxima de saída é da ordem de 200 a 280 mg/m^3 , em média dependendo do processo. Por outro lado, a taxa de emissão típica de um processo de combustão sem filtro é da ordem de 3500 a 6000 mg/m^3 (COELHO, 1999). Neste caso uma eficiência global em torno de 97%, já seria suficiente para atender ao limite de emissão.

Os filtros cerâmicos fibrosos apresentaram os requisitos para condução deste novo tipo de estrutura como alternativa nacional muito promissora para a limpeza de gases a altas temperaturas, visando na condução de estudos objetivando sua utilização industrial.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

O estudo desenvolvido neste trabalho resultou nas seguintes conclusões:

- O desenvolvimento de um filtro cerâmico fibroso, partindo de mantas refratárias comerciais de alumino-silicatos pelo método de prensagem mostrou-se eficiente e economicamente viável.
- Em relação ao método de prensagem para a fabricação do filtro fibroso conclui-se que este é um método simples e barato, pois parte de mantas refratárias comerciais fibrosas, obtendo através da sinterização, um material promissor para o uso em aplicações de filtros a temperaturas elevadas.
- A resistência à compressão apresentou valores entre 0,3 a 1,3 MPa e os testes de flexão apresentaram valores entre 0,2 a 0,7 MPa .
- Para os ensaios de permeabilidade em função da temperatura da corrente gasosa foi observada uma dependência de crescimento de k_1 e de decréscimo para k_2 com a temperatura. Os resultados mostraram que as constantes de permeabilidade do filtro foram influenciadas diretamente pelo aumento da temperatura.
- Foram obtidos bons resultados de eficiência de coleta acima de 95% para partículas na faixa de 2-14 μm nas temperaturas estudadas.
- A eficiência de coleta diminuiu com a elevação da temperatura de tratamento.
- Os valores obtidos de k_1 e k_2 representaram os valores de ordem de grandeza esperados para filtros de gases a altas temperaturas.
- Os filtros apresentaram altas eficiências de coleta e quedas de pressão aceitáveis dentro da escala estudada.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS:

- Caracterizar os filtros cerâmicos fibrosos quanto a suas propriedades térmicas; (condutividade térmica e resistência ao choque térmico).
- Avaliar a possibilidade de produção e implementação dos filtros em escala industrial.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-OTOOM, A.Y. "Prediction of the collection efficiency, the porosity, and the pressure drop across filter cakes in particulate air filtration." *Atmospheric Environment*, v.39, p.51–57, 2005.

AKITSU, Y.; MASAKI, H.; KYO, O. "In: Gas Cleaning at High Temperatures." Edited by R. Clift and J.P.K. Seville, Blackie A&P, U.K, p. 321-345, 1993.

ANTUNES, W.L. "Preparação e Caracterização de Elementos Filtrantes Cerâmicos para a Filtração de Gases Quentes." 1997. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de São Carlos - SP.

ANTUNES, W.L. INNOCENTINI, M.D.M.; BAUMGARTNER, J.B.; SEVILLE, J.P.K.; COURY, J.R.; "Desempenho de Filtros de Dupla Camada Na Filtração de Gases A Altas Temperaturas." *Anais do XXV ENEMP*, v.1, p.157-163, 1997.

BERGMANN, L. "In: Gas Cleaning at High Temperatures." Edited by R. Clift and J.P.K. Seville, Blackie A&P, U.K, p. 294-306, 1993.

BROWN, R.C. "Air Filtration: An integrated approach to the theory and application of fibrous filters." Pergamon Press, Oxford UK, p. 272, 1993 apud INNOCENTINI, M.D.M. "Filtração de gases a altas temperaturas." 1997. Tese de Doutorado - Universidade Federal de São Carlos - SP.

CAVASENO, V. "Industrial Air Pollution Engineering." Mc Graw-Hill, USA, 1980.

CHEUNG, W. Ph.D. Thesis, University of Surrey (1989) apud INNOCENTINI, M.D.M. "Filtração de gases a altas temperaturas." 1997. Tese de Doutorado - Universidade Federal de São Carlos - SP.

CHOI, A.M.; LEE, H.M.; CHANG, J.; LEE, J.S. "Permeability modeling of fibrous media in composite processing." *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, v. 79, p.585-598, 1998.

COELHO S.T. "Mecanismos para implementação da cogeração de eletricidade a partir de biomassa – um modelo para o Estado de São Paulo." 1999. Tese de doutorado - Universidade de São Paulo - SP.

CONAMA, "Conselho Nacional do Meio Ambiente." Resolução nº 382/2006. Ministério do Meio Ambiente, Brasília – Brasil 2006.

COURY, J.R. "Electrostatic effecto in granular bed filtration of gases." 1983. PhD. Thesis, University of Cambridge, UK apud INNOCENTINI, M.D.M. "Filtração de gases a altas temperaturas." 1997. Tese de Doutorado - Universidade Federal de São Carlos - SP.

DULLIEN, F.A.L. "Introduction to Industrial Gas Cleaning." Academic Press, New York 1989 apud INNOCENTINI, M.D.M. "Filtração de gases a altas temperaturas." 1997. Tese de Doutorado - Universidade Federal de São Carlos - SP.

ERGUN, S. "Flow through pached columns." *Chemical Engineering Progress*, v. 48, p.89, 1952.

FERNANDO, J.A.; CHUNG, D.D.L. "Pore Structure and Permeability of Alumina Fiber Filter Membrane for Hot Gas Filtration." *Journal of Porous Materials*, v. 9, p. 211-219, 2002.

FINLEY, J. "Hot gas filtration: diesel-how prepared is the filtration industry?" *Filtration + Separation*, v.16, p.16-20, 2006.

FREI, O.; FRISH, M.; BOBMER, V.; MIZRAH, T. "Ceramic foam for filters for cleaning exhaust gases of diesel engines." US Patent 4.965.101, 1990.

FREITAS, N.L.; MANEIRO, M.G.; COURY, J.R. “Filtração de aerossóis em altas temperaturas utilizando filtros cerâmicos de dupla camada: influencia do diâmetro de partícula na eficiência de coleta.” *Cerâmica* v.50, p. 355-361, 2004.

FREITAS, N.L.; MANEIRO, M.G.; COURY, J.R. “Estudo da permeabilidade de filtros cerâmicos de aerossol em altas temperaturas.” *Projeções* v. 21, p. 29-38, 2003.

FREITAS, N.L.; GONÇALVES, J.A.S.; INNOCENTINI, M D.M.; COURY, J.R. “Development of a double-layered ceramic filter for aerosol filtration at high-temperatures: The filter collection efficiency.” *Journal Hazardous Materials*, v.136 p. 747-756, 2006.

GIBSON, L.J. “Biomechanics of cellular solids.” *Journal of Biomechanics*, v. 38, p. 377-99, 2005.

GIBSON, L.J.; ASHBY, M.F. “Cellular Solids: Structure and properties.” 2nd ed, Cambridge: Cambridge University Press, 1997.

HEIDENREICH, S. “Hot gas filtration with ceramic filters: Experiences and new developementes.” *Filtration and Separation*, May, v. 39, p. 22-25, 2002.

HOLLANDS, K.G.T.; GOEL, K.C. “A General Method for Predicting Pressure Loss in Venturi Scrubbers.” *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*. v.14, p.16-22, 1975.

ISOB, T.; KAMESHIMA, Y.; NAKAJIMA, A.; OKADA, K.; HOTTA, Y. “Gas permeability and mechanical properties of porous alumina ceramics with unidirectionally aligned pores.” *Journal of the European Ceramic Society*, v. 27, p. 53–59, 2007.

INNOCENTINI, M.D.M. “Filtração de gases a altas temperaturas.” 1997. Tese de Doutorado - Universidade Federal de São Carlos - SP.

INNOCENTINI, M.D.M.; MARIANO, W.A.; BAUMGARTNER, J.B.; COURY, J.R. "Performance of two different ceramic filters for high temperature filtration." IN: Proceedings of the Third International Symposium on Gas Cleaning at High Temperatures, Karlsruhe, Alemanha 1996.

INNOCENTINI, M.D.M.; SEPULVEDA, P.; SALVINI, V.R.; PANDOLFELLI, V.C. "Permeability and Structure of Cellular Ceramics: A Comparison between Two Preparation Techniques." Journal of the American Ceramic Society, v. 81, p.3349-52, 1998.

INNOCENTINI, M.D.M.; SALVINI, V.R.; PANDOLFELLI, V.C.; COURY, J.R. "Assessment of Forchheimer's Equation to Predict the permeability of Ceramic Foams." Journal of the American Ceramic Society, v.82, p.1945-48, 1999a.

INNOCENTINI, M.D.M. PANDOLFELLI, V.C. "Considerações sobre a estimativa da permeabilidade em concretos refratários através das equações de Darcy e de Forchheimer." Cerâmica, v. 45, p. 1-13, 1999b.

INNOCENTINI, M.D.M.; PARDO, A.R.F.; SALVINI, V. R.; PANDOLFELLI, V.C. "How accurate is Darcy's law for refractories." American Ceramic Society Bulletin, v.78, p.64-68, 1999c.

INNOCENTINI, M.D.M.; SALVINI, V.R.; COURY, J.R.; e PANDOLFELLI, V.C.; "The Permeability of Ceramic Foams." American Ceramic Society Bulletin, v.78, p.78-84 1999d.

JACKSON, G.W.; and JAMES, D. "The permeability of fibrous porous media." The Canadian Journal of Chemical Engineering, v. 64, p. 364-374, 1986.

JAYMES, I; DOUY, A; GERVAIS, M; COUTURES, J.P. "Crystallizations in the $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ System from Amorphous Powders." Journal of Sol-Gel Science and Technology , v. 8, p. 415-418, 1997.

JUDKINS, R.R.; STINTON, D.P.; DEVAN, J.H. "Transactions of the ASME." v.118, p.500-506, 1996.

KOLTSAKIS G.C.; STAMATELOS, A.M. "Modelling catalytic regeneration of wall-flow particulate filters." Industrial & Engineering Chemistry Research, v. 35, p. 2-13, 1996.

LATELLA, B.A.; HENKEL, L.; MEHRTENS, E.G. "Permeability and high temperature strength of porous mullite-alumina ceramics for hot." Materials and Engineering Science. Australia Nuclear Science and Tecnology Organisation, v. 41, p. 423-430, 2006.

LIPPERT, T. E.; NEWBY, R. A.; ALVIN, M. A.; BACHOVCHIN, D. M.; BRUCK, G. J.; SMELTZER, E. E. "Development of Hot Gas Cleaning Systems for Advanced, Coal- Based Gas Turbine Cycles." Transactions of the ASME, v. 115, p. 658-664, 1993.

MOREIRA, E. A.; COURY, J. R. "The influence of structural parameters on the permeability of ceramic foams." Brazilian Journal of Chemical Engineering, v.21, p. 23-33, 2004.

MOREIRA, E.A.; INNOCENTINI, M.D.M.; COURY, J. R. "Permeability of ceramic foams to compressible and imcompressible flow." Journal of the European Ceramic Society v. 24 p. 3209-3218, 2004.

MUNHOZ, J.A. (Documento Eletrônico), Acesso em julho de 2007.

www.segurancaetrabalho.com.br/download/mascaras-filtros.pdf

OLIVEIRA, C.A.; COURY, J.R. "Performance of a Venturi Scrubber in the Removal of Inhalable Particles from the Air." Brazilian Journal of Chemical Engineering, v.13, p. 09-20, 1996.

OLIVEIRA, F.A.C.; DIAS, S.; VAZ, M.F.; FERNANDES, J.C. "Behaviour of open-cell cordierite foams under compression." *Journal of the European Ceramic Society*, v. 26, p. 179-86, 2006.

OWEN, I.; SYRED, N.; REED, G.P. "A fluidic regenerative filtration system for hot gas cleaning." *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, v.105, p.185-191, 1983.

PASTILA, P.; HELANTI, V.; NIKKILÄ, A. P.; MÄNTYLÄ, T. "Environmental effects on microstructure and strength of SiC-based hot gas filters." *Journal of the European Ceramic Society*, v.21, p.1261-1268, 2001.

PEUKERT, W.; LOEFFLER, F. "Influence of temperature on particle separation in granular bed filters." *Powder Technology* v. 68, p. 263-270, 1991.

PILZ, T. "Particle properties relevant for hot gas cleaning with rigid barrier filters and their characterization at high temperature." *High temperature gas cleaning*, p.132-144, 1996.

PODGÓRSKI, A.; BALAZI, A.; GRADÓN, L. "Application of nanofibers to improve the filtration efficiency of the most penetrating aerosol particles in fibrous filters." *Chemical Engineering Science*, v. 61, p. 6804-6815, 2006.

REIJNEN, K.; BRAKEL, J. V. "Gas cleaning at high temperatures and high pressures: A review." *Powder Technology*, v. 40, p. 81-111, 1984.

RODIRGUES, M.V. "Determinação da carga eletrostática em aerossóis e seu efeito na filtração de gases." 2005. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São Carlos- SP.

RUIZ, J. C.; BLANC, PH.; PROUZET, E.; CORYN, P.; LAFFONT, P.; LARBOT, A. "Solid aerosol removal using ceramic filters." *Separation Purification Technology*, v.19, p. 221-227, 2000.

SALVINI, V. R.; PUPIM, A. M.; INNOCENTINI, M. D. M.; PANDOLFELLI, V. C. "Otimização do processamento para a fabricação de filtros no sistema $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC}$." *Cerâmica*, v.47, p. 13-18, 2001.

SALVINI, V.R.; INNOCENTINI, M.D.M.; PANDOLFELLI, V.C. "Correlação entre permeabilidade e resistência mecânica de filtros cerâmicos no sistema $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC}$." *Cerâmica*, v. 46, p. 97-103, 2000.

SALVINI, V.R.; INNOCENTINI, M.D.M.; PANDOLFELLI, V.C. "Influência das condições de processamento cerâmico na resistência mecânica e na permeabilidade dos filtros de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC}$." *Cerâmica*, v. 48, p. 121-25, 2002.

SCHEFFLER, M. AND COLOMBO, P.; "Cellular Ceramics." 1° Ed. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA Weinheim, Alemanha 2005.

SEVILLE, J.P.K.; CHEUNG, W., CLIFT, R. "Patchy Cleaning Interpretation of Dust Cake Release from non-Woven Fabrics." *Filtration and Separation*, May/June p.187-190, 1989.

SEVILLE, J.P.K. "Gas Cleaning in Demanding Applications." Blackie Academic & Professional, Glasgow, (1997).

SOKOLOVIC, S.M.R.; VULIC, J.T.; SOKOLOVIC, M.S.; NEDUCIN, M.P.R. "Effect of fibrous permeability on steady-state coalescence." *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 42, p. 3098-3102, 2003.

SONG, C. B.; PARK, H. S.; LEE, K. W. "Experimental study of filter clogging with monodisperse PSL particles." *Powder Technology*, v.163 p. 152-159, 2006.

SOUZA, E. "Processamento e caracterização de vitrocerâmico celular do sistema Lzsa." 2007. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina – SC.

SPURNY, K. R. "Advances in aerosol filtration." CRC Press LLC, Florida, p.533, 1998.

STEFFENS, J. "Desempenho de filtros fibrosos operando na remoção de partículas nanométricas de aerossóis." 2007. Tese de Doutorado, Universidade Federal de São Carlos-SP.

STEFFENS, J.; COURY, J. R. "Collection efficiency of fiber filters operating on the removal of nano-sized aerosol particles II. Heterogeneous fibers." Separation and Purification Technology, Article in Press 2007.

TIENE, E.F. "Filtração de gases: Estudo do fenômeno da limpeza por blocos." 2005. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São Carlos-SP.

VASCONCELOS, W. L. "Descrição da permeabilidade das cerâmicas porosas." Cerâmica, v.43, p.119-122, 1997.

ZIEVERS, J.F.; EGGERSTEDT, P.M.; ZIEVERS, E.C. "Porous Ceramics for Gas Filtration." Ceramic Bulletin, v.70, p.108-111, 1991.

ZIEVERS, J.F.; EGGERSTEDT, P.M.; ZIEVERS, E.C.; NICOLAI, D.; Transactions of the ASME, v.115, p.652-657, 1993.

ZESCHKY, J.; HÖFNER, T.; ARNOLD, C.; WEIßMANN, R.; BAHLOUL-HOURLIER, D.; SCHEFFLER, M.; GREIL, P. "Polysilsesquioxane derived ceramic foams with gradient porosity." Acta Materialia, v. 53, p. 927-37, 2005.

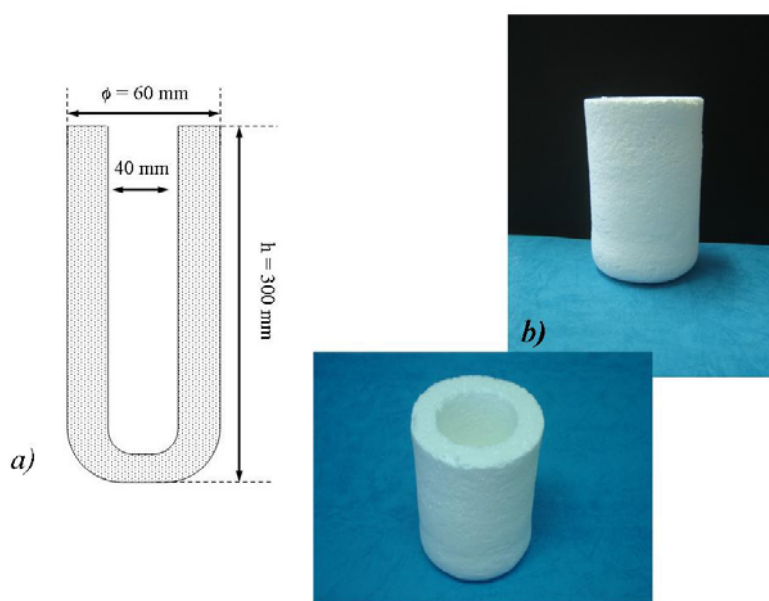
WAGH, A.S.; POEPPEL, R.B.; SINGH, J.P. "Open pore description of mechanical properties of ceramics." *Journal of Materials Science*, v. 26, p. 3862-68, 1991.

ANEXO A

Este trabalho foi desenvolvido dentro do projeto:

Processamento e caracterização de filtros cerâmicos para limpeza de gases a temperaturas elevadas. Edital CT-Energ/MCT/CNPq nº 029/2004. Redes Cooperativas de Pesquisa - Segunda Fase. Coordenador: Dachamir Hotza. 2005/2007. Universidades participantes: UFSC, USP, UFSCar, UFRN, UNAERP.

A Figura mostra o desenho esquemático do protótipo desenvolvido em escala laboratorial e fotos desse protótipo.



Desenho e protótipo de um filtro tipo vela fabricado.